

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II
DIPARTIMENTO INGEGNERIA DEI MATERIALI E DELLA
PRODUZIONE



DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA
DEI MATERIALI E DELLA PRODUZIONE

indirizzo in
Tecnologie e Sistemi di Produzione

XXI Ciclo

TESI DI DOTTORATO

“STUDIO, MODELLAZIONE E SPERIMENTAZIONE
DI UN COMPOSITO A MATRICE CEMENTIZIA PER
RINFORZO STRUTTURALE”

TUTOR
CH.MO. PROF. ING.
IGNAZIO CRIVELLI VISCONTI

DOTTORANDO
ING. DOMENICO BRIGANTE

COORDINATORE
CH.MO. PROF. ING. GIUSEPPE GIORLEO

ANNO ACCADEMICO 2007-2008

Indice

I.I Ringraziamenti	6
I.II Presentazione del progetto	7
Capitolo 1-I materiali compositi e loro proprietà	10
1.1 Definizione e caratteristiche	12
1.2 Proprietà dei componenti	14
1.3 Le fibre	16
1.3.1 Fibre di vetro	17
1.3.2 Le fibre di carbonio	22
1.3.3 Le fibre di boro	25
Capitolo 2- I materiali compositi nell'edilizia	27
2.1 Applicazione dei materiali compositi nell'edilizia civile	29
2.2 Armatura di materiali tradizionali	31
2.3 Profili strutturali	32
2.4 Rinforzi o ripristini strutturali	34
2.4.1 Sistemi di rinforzo	38
2.4.2 Limiti di utilizzo dei sistemi di rinforzo composito tradizionali nelle strutture in muratura	41
2.5 Fibre di acciaio per l'armatura del calcestruzzo	45
Capitolo 3-Aspetti normativi	49
3.1 Quadro normativo	51
3.2 Il documento tecnico italiano: CNR-DT 200/2004	52
3.3 Rinforzo di strutture murarie	54
3.3.1 Oggetto ed ambito di applicazione	54

3.3.2 Interventi di restauro su strutture di interesse storico e monumentale	55
3.3.3 Criteri per il progetto del consolidamento strutturale	55
3.3.4 Articolazione degli interventi	57
3.3.5 Comportamento della struttura	58
3.3.6 Valutazione della resistenza alla delaminazione	60
3.3.7 Taglio	63
3.3.8 Obiettivo della progettazione del rinforzo	63
3.3.9 Installazione, monitoraggio e controllo	67
3.3.10 Raccomandazioni per l'esecuzione a regola d'arte	69
3.3.11 Qualifica degli operatori	71
3.3.12 Monitoraggio dell'intervento di rinforzo	72
Capitolo 4 – Caratteristiche dei materiali utilizzati	74
4.1 I materiali costituenti la matrice	75
4.1.1 Cemento alluminoso	79
4.1.2 Lattice	82
4.1.3 Fibre di carbonio	83
4.2 Preparazione e proprietà meccaniche della matrice	84
4.3 I materiali costituenti i chiodi di armatura	87
4.3.1 Fibre di carbonio	88
4.3.2 Resina epossidica	89
4.4 Preparazione e proprietà meccaniche dei chiodi di armatura	91

Capitolo 5 - Caratterizzazione del cemento	95
5.1 Premessa	95
5.2 Descrizione della prova: Norma UNI EN 196-1	95
5.3 Prove di flessione	100
5.3.1 Prima fase di prove	100
5.3.2 Analisi dei risultati della prima fase e premessa della seconda	104
5.3.3 Seconda fase di prove	105
5.4 Analisi dei risultati	119
Capitolo 6 - Applicazioni della malta su supporto	122
6.1 Introduzione	122
6.2 Descrizione della prova di adesione	123
6.2.1 Prove di adesione	126
6.2.2 Analisi dei risultati	128
6.3. Descrizione della prova di flessione su due mattoni	129
6.3.1 Prima fase di prove	133
6.3.2 Realizzazione dei chiodi	142
6.3.3 Seconda fase di prove	146
6.3.4 Analisi dei risultati	155
Capitolo 7 - Prove di compressione su provini in muratura	158
7.1 Studi teorici	158
7.2 Scopo della prova	161
7.3 Meccanismi di collasso dei pannelli murari	161
7.4 Calcolo analitico della sollecitazione di taglio e della resistenza a trazione	162

7.5 Esecuzione della prova	165
7.6 Analisi dei risultati	169
Capitolo 8 – Micromeccanica	172
8.1 Compositi con fibre continue unidirezionali – La regola delle miscele	173
8.2 Compositi con fibre corte	178
8.2.1 Il modello shear lag di Kelly-Tyson	181
8.2.2 Il modello shear lag di Cox	186
8.3 Compositi con fibre corte unidirezionali	190
8.4 Compositi con fibre corte random	193
8.5 Compositi con fibre corte – Modelli con interfaccia imperfetta	194
Capitolo 9 – Caratterizzazione dell’interfaccia fibra-matrice	197
9.1 La prova di pull-out	198
9.2 Esecuzione dei test: chiodi a due tows.	199
9.3 Analisi dei risultati	201
9.4 Esecuzione dei test: chiodi a un tow.	202
9.5 Analisi dei risultati.	203
9.6 Scelta del modello	208
Conclusioni	212
Bibliografia	214

Ringraziamenti

A conclusione di questo percorso, sento il desiderio di ringraziare tutte le persone che mi hanno sostenuto con la loro competenza ed il loro appoggio morale, riponendo in me un'enorme fiducia e appoggiandomi nell'intraprendere un nuovo progetto di ricerca che è oggetto del presente lavoro. Voglio ringraziare le persone che anche quando il mio tempo sembrava non bastare mai, hanno mostrato una comprensione totale, aiutandomi e collaborandomi su tutti i fronti.

Sarebbe troppo numeroso l'elenco di persone da nominare ma sicuramente un ringraziamento va a tutti i vari professori, ricercatori, dottorandi e collaboratori del DIMP che non si sono mai tirati indietro quando mi serviva una mano un consiglio o qualsiasi cosa, dimostrando al di sopra dell'aspetto lavorativo una disponibilità umana che in molti casi si è trasformata in amicizia.

Un ringraziamento particolare va al Prof. Ignazio Crivelli Visconti e all'Ing. Claudio Cigliano per la disponibilità e la fiducia accordatami costantemente e al Prof. Massimo Durante per la continua collaborazione su ogni aspetto delle mie ricerche.

Non finirò mai di ringraziare la mia famiglia che mi è sempre stata vicina e mi ha incoraggiato a raggiungere questo traguardo.

Presentazione del progetto

Negli ultimi anni si è assistito ad un'ampia diffusione dei materiali compositi nel campo dell'Ingegneria civile in applicazioni relative sia a strutture di nuova costruzione che ad edifici già esistenti.

In questo ambito, una delle più interessanti applicazioni riguarda gli interventi di consolidamento strutturale tramite polimeri fibrorinforzati (FRP) per il recupero di strutture deteriorate o per il loro adeguamento antisismico.

In particolare, il rinforzo delle strutture in muratura può essere conseguito, mediante l'uso di materiali compositi, applicando ad esse un materiale con buona resistenza a trazione, dotato di un'interfaccia tecnologicamente compatibile che, assicurando l'adesione ai singoli mattoni, sia in grado di ridurre le sollecitazioni di taglio nei letti di malta interstiziali, conferendo al sistema un comportamento monolitico fino alla rottura.

Il danneggiamento della muratura dovuto ad azioni orizzontali, quali possono essere quelle prodotte da eventi sismici o da dissesti lenti in atto, è, infatti, associato, principalmente, al danneggiamento dei giunti di malta. In particolare, esso si

manifesta con fenomeni di scorrimento relativo dei blocchi rispetto all'interfaccia, previa decoesione.

La tecnologia attualmente più consolidata consiste nell'applicazione di strisce in fibra di carbonio, secondo una griglia ortogonale o diagonale, mediante resine epossidiche sulla superficie regolarizzata della parete.

Agli innegabili vantaggi di tale intervento, quali la facilità di trasporto dei materiali, la resistenza alla corrosione, la bassa invasività e la reversibilità dell'intervento di rinforzo, corrispondono, tuttavia, alcune limitazioni: la matrice epossidica presenta, infatti, scarsa resistenza al fuoco ($T < 80^\circ$) e richiede, per la sua corretta polimerizzazione, assenza di umidità e temperature ambientali comprese tra i 5° e i 25°C ; la superficie di applicazione deve essere perfettamente planare per evitare distacchi del rinforzo. L'applicazione di queste tipologie di rinforzo richiede, inoltre, maestranze altamente specializzate.

Il presente lavoro di ricerca vuole studiare un metodo alternativo di rinforzo o ripristino strutturale, attraverso lo sviluppo di un materiale composito a matrice cementizia, in modo da coniugare i vantaggi connessi all'utilizzo dei materiali compositi quali l'uso di una fase fibrosa ad alta resistenza e basso peso, con quelli connessi all'uso della matrice cementizia che, rispetto a quella polimerica, garantisce un miglior comportamento alle temperature elevate. Si vogliono determinare sia la tipologia che le possibili geometrie del rinforzo, unitamente alla formulazione di una malta capace di consentire una appropriata impregnazione

ed inglobamento del rinforzo, che allo stesso tempo abbia una buona lavorabilità.

Il lavoro condotto mira, inoltre, all'ottenimento di un prodotto che non richieda l'impiego di manodopera specializzata per la sua applicazione, consentendo così una maggiore durabilità, ripetibilità ed economicità degli interventi.

Il raggiungimento di significativi risultati potrà poi giustificare lo sviluppo di un apposito modello matematico tale da consentire la comprensione dei meccanismi e la determinazione della miglior geometria degli elementi di rinforzo.

Capitolo 1

I materiali compositi e loro proprietà

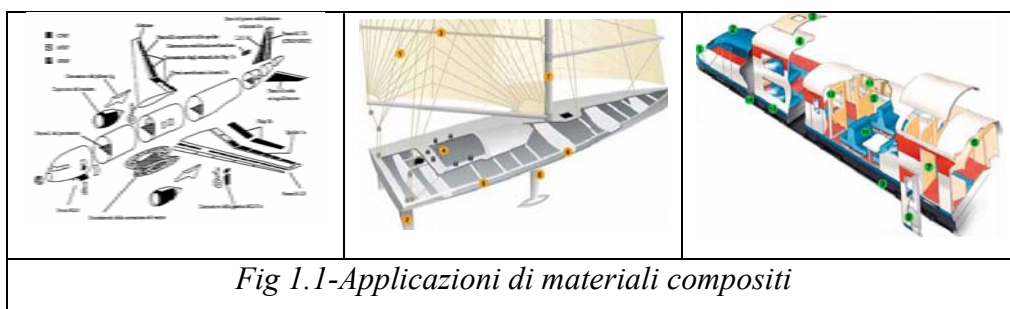
Lo studio dei compositi è una filosofia di progetto di materiali che si propone di ottimizzare nello stesso tempo la composizione del materiale con il progetto di ottimizzazione strutturale in un processo convergente ed interattivo. È una scienza e una tecnologia che richiede la stretta interazione di diverse discipline come progetto ed analisi strutturale, analisi dei materiali, meccanica dei materiali ed ingegneria di processo.

Dal punto di vista storico il concetto di rinforzo con fibra è assai vecchio. Ci sono addirittura nella bibbia riferimenti al rinforzo di laterizi con paglia nell'antico Egitto. Barrette di ferro erano usate per rinforzare le murature nel XIX secolo e questo portò allo sviluppo del cemento armato. Resine fenoliche rinforzate con amianto furono introdotte nel XX secolo. La prima barca in vetroresina fu realizzata nel 1942 e dello stesso periodo sono le plastiche rinforzate per l'impiego aeronautico e per componenti di apparecchiature elettriche. Elementi avvolti furono inventati nel 1946 ed usati in applicazione nel campo missilistico negli anni '50. Le prime fibre di boro e di carbonio ad alta resistenza furono introdotte nei primi anni '60 con l'applicazione

di compositi avanzati per componenti aeronautici. Compositi con matrici metalliche come boro/alluminio furono introdotte nel 1970. La Dupont sviluppò fibre aramidiche nel 1973.

A partire dagli ultimi anni '70 le applicazioni dei compositi si espansero fortemente in campo aeronautico, automobilistico, per articoli sportivi e per applicazioni in industrie biomediche. Gli anni '80 portarono ad un significativo sviluppo nell'utilizzo di fibre ad alto modulo di elasticità.

Oggi l'enfasi è posta sullo sviluppo di più moderni compositi con matrici metalliche e ceramiche per le applicazioni ad alta temperatura. Si hanno innumerevoli applicazioni: tubi interrati, container, barche, veicoli di terra, strutture aeronautiche e spaziali, applicazioni nell'edilizia civile, componenti per automobili, attrezzi sportivi, prodotti biomedici e moltissimi altri prodotti progettati per avere alte prestazioni meccaniche e/o stabilità dimensionale nei diversi ambienti accoppiati e bassi pesi.



1.1 Definizione e caratteristiche

Un composito è un sistema che consiste di due o più fasi, le cui proprietà e prestazioni sono progettate in modo tale da essere superiori a quelle dei materiali costituenti che agiscono indipendentemente. Normalmente una delle due fasi è discontinua, più rigida e più forte ed è chiamata “rinforzo”, mentre la fase meno rigida e più debole, è continua ed è chiamata “matrice”. Talvolta a causa di interazioni chimiche od altri effetti, esiste una fase aggiuntiva, chiamata “interfase”, tra rinforzo e matrice.

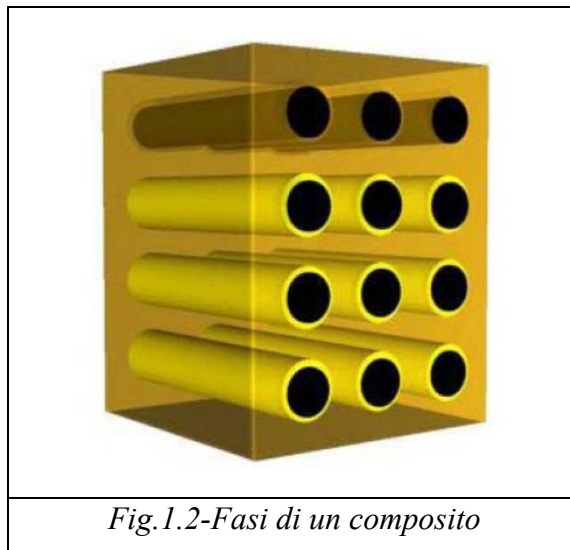


Fig.1.2-Fasi di un composito

Le proprietà di un composito dipendono dalle proprietà dei costituenti, dalla geometria e distribuzione delle fasi. Uno dei parametri più importanti è il volume (o il peso) della frazione di rinforzo o il rapporto di volume delle fibre. La distribuzione del rinforzo determina le caratteristiche del sistema. Meno è

uniforme il rinforzo, più è eterogeneo il materiale e più alta è la probabilità di rottura nelle aree più deboli. La geometria e l'orientamento del rinforzo, invece, influiscono sull'anisotropia del sistema.

Le fasi del composito hanno ruoli differenti che dipendono dal tipo e dalla messa in opera del composito. Nel caso di compositi con prestazioni basse o medie, il rinforzo, usualmente fibre corte o particelle, dà un certo irrigidimento ma rinforza solo localmente il materiale. La matrice d'altra parte, è il costituente principale per reggere i carichi e definisce le proprietà meccaniche del materiale.

Nel caso di compositi ad alte prestazioni strutturali, il rinforzo è normalmente costituito da fibra continua e forma lo scheletro del materiale, determinando la rigidità e la resistenza nella direzione della fibra. La fase matrice procura la protezione ed il sostegno per le fibre ed il trasferimento degli sforzi locali da una fibra all'altra. L'interfase, anche se di piccola dimensione, può giocare un ruolo importante nel controllo del meccanismo di rottura, nella resistenza alla frattura e, soprattutto, nel comportamento sforzi/deformazioni del materiale.

1.2 Proprietà dei componenti

I compositi hanno vantaggi unici rispetto ai materiali monolitici, come alta resistenza, alta rigidezza, lunga vita a fatica, bassa densità ed adattabilità alle funzioni che si vogliono dare alla struttura. Miglioramenti aggiuntivi possono essere ottenuti nella resistenza alla corrosione, resistenza all'usura, estetica, comportamento in funzione della temperatura, stabilità termica, isolamento e conduttività termica, isolamento acustico.

Le basi delle migliori prestazioni strutturali dei materiali compositi sono l'alta resistenza specifica (rapporto resistenza/densità) e l'alta rigidezza specifica (rapporto modulo E /densità) e nel carattere anisotropo ed eterogeneo del materiale. Queste ultime caratteristiche danno al sistema composito molti "gradi di libertà" che consentono di ottimizzare la configurazione del materiale. I compositi però hanno alcune limitazioni che i materiali monolitici convenzionali non hanno.

Visti alla scala delle dimensioni della fibra, i compositi hanno il vantaggio dell'alta rigidezza e dell'alta resistenza della fibra. La normalmente bassa tenacità a rottura della fibra è compensata dalla dissipazione di energia dell'interfaccia fibra/matrice e dalla duttilità della matrice. La capacità di trasferire gli sforzi della matrice permette lo sviluppo di meccanismi di frattura diffusi.

D'altra parte le fibre mostrano una dispersione di resistenza relativamente elevata. La concentrazione di sforzi locali attorno alle fibre riduce la resistenza trasversale a trazione in modo

apprezzabile. I materiali convenzionali sono più sensibili alla loro microstruttura ed a irregolarità locali che influenzano il comportamento fragile o duttile del materiale.

In una analisi macromeccanica, in cui il materiale è trattato come quasi omogeneo, la sua anisotropia può essere usata in modo vantaggioso. Il comportamento medio del materiale può essere previsto e controllato dalle proprietà dei costituenti. Comunque l'analisi anisotropa è più complessa e più dipendente dalle procedure di calcolo. D'altra parte, l'analisi per i materiali convenzionali è molto più semplice a causa della loro isotropia e omogeneità.

L'analisi di una struttura in composito richiede l'inserimento dei dati relativi alle proprietà medie dei materiali. Queste possono essere previste sulla base delle proprietà e della disposizione dei costituenti.

In ogni modo la verifica sperimentale dell'analisi o una caratterizzazione indipendente richiede un programma completo ed esaustivo per la determinazione dei parametri di un gran numero di campioni dei materiali di base. Per i materiali convenzionali la caratterizzazione meccanica è semplice dal momento che sono sufficienti solo due costanti elastiche e due valori di resistenza.

I compositi possono operare per lunghi periodi di tempo anche in ambienti aggressivi. Hanno lunga vita a fatica e in molte applicazioni possono essere facilmente riparati. Di contro essi sono sensibili ad ambienti soggetti a sbalzi igro-termici. La crescita dei danneggiamenti prodotti dall'uso può avvenire

all'interno del composito e sono necessarie sofisticate tecniche non distruttive di rilevamento e monitoraggio. Talvolta è necessario applicare rivestimenti protettivi contro l'erosione, i danneggiamenti di superficie e le fulminazioni.

I materiali convenzionali, di solito metalli, sono soggetti alla corrosione in ambiente aggressivo. Difetti e incrinature possono formarsi nell'uso e possono crescere e propagarsi fino a cedimenti catastrofici. Anche se il rilevamento di questi difetti può essere più facile al contrario non è facile poi riparare i materiali convenzionali.

1.3 Le fibre

Come accennato, grazie alle loro dimensioni limitate, le fibre presentano una perfezione strutturale fuori del comune; questa caratteristica, unita alle proprietà intrinseche dei materiali costitutivi, assicura ad esse:

- resistenza meccanica elevata
- modulo elastico molto alto
- peso specifico molto basso
- comportamento elastico lineare fino alla rottura.

Le fibre più importanti per uso in compositi possono essere di vetro, carbonio, organiche e minerali. Esse si trovano nei compositi o sotto forma di fibre continue disposte parallelamente in un piano, o sotto forma di fibre tagliate e disposte in un piano con orientazione casuale (MAT) o, infine,

possono essere tessute secondo una configurazione trama-ordito e disposte in un piano.

Le fibre di vetro rappresentano il tipo più comune di rinforzo per i compositi a matrice polimerica grazie al loro basso costo, alla elevate resistenze alla trazione, all' impatto ed all' attacco chimico. Esse presentano però alcuni svantaggi quali: ridotti valori di modulo elastico, bassa resistenza a fatica e una scarsa adesione alle matrici polimeriche; per arginare tale svantaggio è necessario l'impiego di “apretti” applicati sulla superficie delle fibre che però potrebbero favorire l'insorgere di tensioni indesiderate per l'assorbimento di umidità.

1.3.1 Fibre di vetro

Le fibre di vetro sono prodotte nella forma standard come vetro E, noto essenzialmente per applicazioni elettriche. Una fibra più resistente è il vetro S: la sua resistenza a trazione è, infatti, circa il 33% più grande del vetro E.

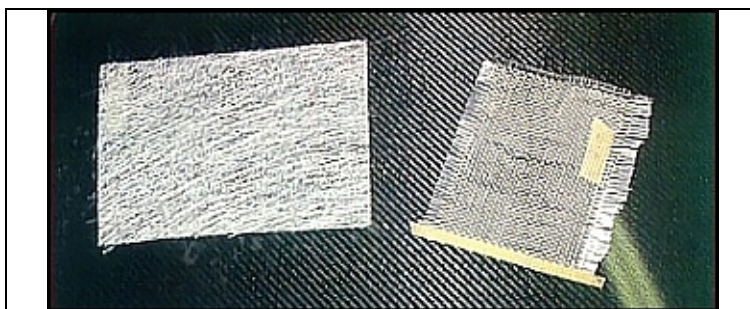


Fig. 1.3 Fibre di vetro

Questo tipo di vetro è largamente utilizzato per applicazioni aerospaziali, dove sono richiesti alti rapporti resistenza su peso e buone caratteristiche a temperature elevate, insieme con un alto limite di fatica: qualità, tutte presenti nel vetro di tipo S.

Un altro tipo di fibra di vetro è ottenuto con vetro ad alto contenuto di alcali: essa ha una buona resistenza chimica ma presenta proprietà elettriche modeste, vetro C. Altri tipi di vetro sono il vetro D, con ottime caratteristiche elettriche, e quello L, che per il suo contenuto in piombo, realizza una buona protezione alle radiazioni e può essere usato come traccia per il controllo ai raggi x dell'allineamento delle fibre.

In Tabella è riportato, a seconda dell'impiego, il tipo di vetro più idoneo.

<i>Impiego</i>	<i>Tipo di vetro</i>
<i>Fibre multiscopo</i>	<i>E</i>
<i>Fibre resistenti agli acidi</i>	<i>A, C, CR</i>
<i>Fibre resistenti agli alcali</i>	<i>R, S</i>
<i>Fibre alta resistenza meccanica</i>	<i>R, S</i>
<i>Fibre alte caratteristiche dielettriche</i>	<i>D</i>
<i>Tabl.1- Tipo di vetro usato a seconda dello scopo.</i>	

Tutti i vetri hanno un rapporto resistenza su peso molto alto, sebbene le fibre di vetro siano fra le fibre inorganiche sintetiche a densità più alta. Il vetro mantiene le sue proprietà meccaniche,

fino al 50% delle sue capacità di resistenza , ad una temperatura di 375°C, e fino al 25% a 538°C. I vantaggi delle fibre di vetro, in particolare della fibra “E” rispetto ad altri materiali, sono:

- Rapporto tra alta resistenza alla trazione ed alta resistenza al peso: a parità di peso, la fibra di vetro è due volte più resistente di un filo d'acciaio
- Stabilità dimensionale: il vetro non si accorcerà o non si allungherà in relazione alle variazioni atmosferiche. Le fibre di vetro mostrano un allungamento massimo del 3% a rottura
- Alta resistenza al calore: le fibre di vetro si comportano bene in applicazioni dove devono essere tollerate alte temperature. Esse hanno ancora il 50% della resistenza a trazione, alla temperatura di 340°C
- Basso assorbimento di umidità: il vetro è un materiale acellulare per cui l'umidità non può penetrare nella superficie dei filamenti
- Notevoli proprietà elettriche: il vetro possiede una bassa costante dielettrica e delle buone capacità isolanti
- Alta resistenza alla fiamma: il vetro non brucia oppure brucia senza dar luogo a fiamma.

Risultato di quanto sopra esposto, è un prodotto in cui sono combinate diverse proprietà fisiche, che non possono essere ottenute con fibre organiche. La resistenza delle fibre di vetro dipende dalle condizioni di formazione, come pure dal sistema di rivestimento impiegato per trattare la superficie della fibra di vetro.

La fase di copertura ha un significativo effetto sulla resistenza delle fibre di vetro e sulle loro proprietà di superficie. L'effetto del trattamento chimico di superficie ha dimostrato di migliorare la resistenza delle fibre di vetro fino al 20%.

Il sistema di copertura (trattamento chimico) consiste in un rivestimento organico che viene applicato alle fibre di vetro immediatamente sotto al rivestimento isolante e prima che i filamenti siano tirati insieme a formare un unico capo. I rivestimenti, sono applicati allo scopo di proteggere le fibre di vetro durante il successivo processo di lavorazione e per ottenere un optimum di compatibilità con le resine da rinforzare. Gli ingredienti impiegati nella copertura delle fibre dipendono dalle specifiche applicazioni: essi sono brevettati e classificati in una o più categorie.

Gli agenti accoppianti, come il loro nome suggerisce, hanno la funzione principale di accoppiare le fibre di vetro alla matrice oppure ad altri ingredienti di copertura, i quali a loro volta interagiscono con la matrice.

Quando tra le fibre di vetro e la matrice si è formato un legame chimico, i compositi in vetro rinforzati divengono un materiale molto resistente impiegabile in campo ingegneristico, come conseguenza di un efficiente trasferimento di sollecitazioni da una matrice relativamente debole a fibre di vetro molto resistenti.

Per facilitare il processo di lavorazione e di composizione sono necessari i lubrificanti: le fibre di vetro essendo materiale fragile sono facilmente abrase quando vengono a contatto con

altri materiali, compreso lo stesso vetro. Durante il processo di lavorazione si determina una rottura dei filamenti, che dà luogo a lanugine di vetro che si disperde nell'aria. Un'adeguata selezione dei lubrificanti può ridurre tale fenomeno.

Il processo di fabbricazione delle fibre di vetro ha inizio con il pesare con cura i componenti del vetro per poi miscelarli in una massa omogenea di composizione predefinita. Il tutto viene posto in un forno ed esposto a temperatura sufficiente (1400°C circa) a convertire i carbonati e la sabbia in ossidi liquidi, i quali devono possedere una sufficiente viscosità e flusso per produrre un'adeguata omogeneità. Il vetro fuso viene poi raffreddato a temperature più basse (1100°C) in modo da renderlo idoneo alle successive fasi lavorative: per produrre vetri con minimi difetti e di alta qualità, sono indispensabili condizioni operative ottimali e forni correttamente progettati.

La massa fusa di vetro d'alta qualità è poi tirata attraverso dei fori praticati in una piastra di platino, e ridotta a fibre di diametro voluto. La piastra riscaldata elettricamente, è dotata d'ugelli che variano in genere da 200 a 4000. Immediatamente al di sotto della piastra viene applicato ai filamenti una copertura o rivestimento organico.

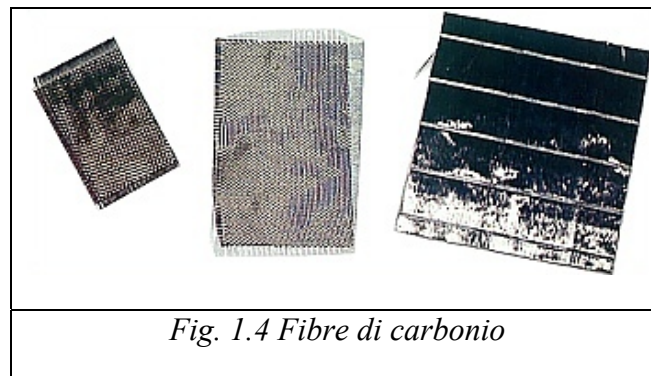
I filamenti possono essere raccolti in vario numero in fasci mediante un pettine o un ceppo di raccolta. Ad esempio quando viene impiegata una piastra con 400 ugelli ed un ceppo di raccolta con fessure a due vie si produrranno due fasci di 200 filamenti ciascuna, che verranno poi avvolti su un pettine. Il risultato finale sarà la formazione di una matassa. Per evitare che

i fasci non giacciono paralleli gli uni agli altri e possano essere dipanati senza difficoltà, viene utilizzata una linea trasversale o spirale onde imprime un movimento a zig zag dei capi appena essi si avvicinano alla superficie dell'organo.

I pacchi che vengono realizzati sono posti nel forno per rimuovere l'acqua e assicurare la copertura della superficie del vetro. Successivamente essi vengono messi in una rastrelliera e riuniti in fasci a formare gomitoli.

1.3.2 Le fibre di carbonio

Per lungo tempo le fibre più usate in applicazioni di compositi strutturali sono state quelle di vetro. Sebbene abbiano buone caratteristiche di resistenza e bassa densità, presentano un modulo di elasticità relativamente basso. Per questo motivo, circa 25 anni fa, si iniziò a sperimentare e convertire compositi organici in fibre e tessuti di carbonio e grafite.



Le elevate proprietà meccaniche delle fibre di carbonio derivano dalla particolare struttura cristallina della grafite. Quanto più la struttura cristallina è elevata, tanto più il materiale possiede caratteristiche notevoli.

Un cristallo di grafite ha una struttura composta da strati sovrapposti di piani costituiti da atomi di carbonio. I legami fra gli stessi atomi dello stesso piano sono forti (legami covalenti) mentre quelli fra atomi di piani differenti sono relativamente deboli (legami Van der Waals): è evidente come i cristalli siano strutture fortemente anisotrope e sarà compito del processo di fabbricazione disporre la struttura cristallina nella direzione voluta.

Naturalmente ciò non è facile: praticamente non si riesce mai ad ottenere cristalli perfetti e precisione nell'orientamento, per cui le caratteristiche meccaniche risultanti saranno più basse di quelle teoriche.

Le fibre di carbonio sono ottenute grafitizzando in atmosfera inerte, a oltre 2000°C, delle fibre organiche tessili di rayon o poliacrilonitrile (PAN). Le fibre di partenza prendono il nome di precursori. Durante il processo di grafitizzazione le fibre sono sottoposte a trazione, quanto maggiore è lo sforzo di trazione esercitato, tanto più alto risulta il modulo di Young del prodotto.

D'altra parte l'aumento del modulo viene bilanciato da una diminuzione di resistenza. Esistono così in commercio sia fibre di

carbonio ad alto modulo, penalizzate nella resistenza, sia a basso modulo e alta resistenza.

I due tipi sono detti rispettivamente C1 e C3 o , con terminologia anglosassone, HM («High Modulus», cioè alto modulo) e HS («High strength», cioè alta resistenza a trazione).

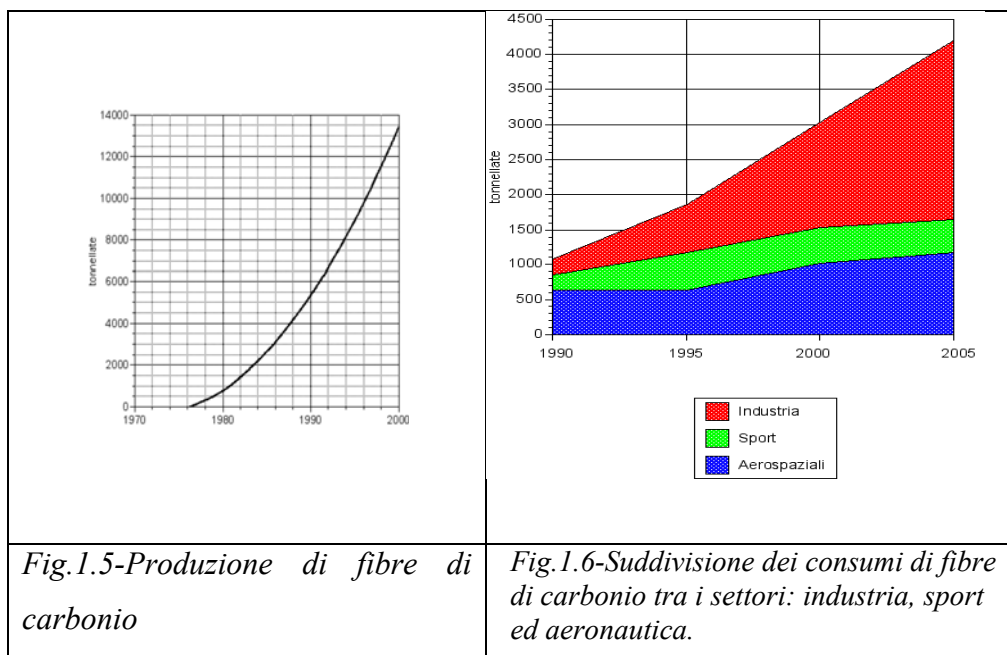
Rispetto alle fibre di vetro, quelle di carbonio presentano tre vantaggi sostanziali:

- un modulo elastico molto alto;
- una massa volumica bassa;
- un coefficiente di dilatazione termica molto basso.

Esse perciò stanno soppiantando le fibre di vetro in tutti quei campi in cui sono richieste, oltre a un basso peso, un'alta rigidità (strutture aeronautiche, attrezzi sportivi ecc.) o una notevole stabilità dimensionale al variare della temperatura (dispositivi ottici, radar ecc.).

L'ostacolo alla diffusione generalizzata delle fibre di carbonio è costituito però dal loro costo, ancora relativamente elevato. Il loro colore, nero brillante, le rende inconfondibili.

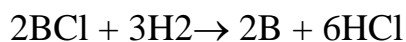
La capacità produttiva delle fibre di carbonio è stimabile in circa 12.000 tonnellate annue. Nonostante ci siano stati momenti di crisi, l'andamento dei consumi è decisamente positivo.



1.3.3 Le fibre di boro

Nella fabbricazione delle fibre di boro un filamento di tungsteno, del diametro di circa 0,01mm, viene riscaldato alla temperatura di 1100°C. In queste condizioni, esso è introdotto in un ambiente in cui è contenuta una miscela di tricloruro di boro (BCl₃) e idrogeno.

A contatto con la superficie calda del filamento, la miscela dà luogo alla reazione:



e il boro così formato si deposita sul filamento. La fibra di boro ottenuta contiene quindi in realtà anche il filamento di tungsteno.

Le fibre di boro presentano modulo e resistenza assolutamente eccezionali, di gran lunga superiori a quelle dell'acciaio e delle altre fibre normalmente usate.

Purtroppo il metodo di fabbricazione pone dei problemi di costo, per cui questo tipo di fibra presenta anche un costo elevatissimo. Inoltre il diametro di queste fibre è circa 10 volte superiore a quello delle altre, e impedisce che esse assumano dei valori di curvatura elevati senza rompersi.

I materiali compositi nell'edilizia

I materiali compositi stanno attualmente trovando una larga diffusione nel settore delle costruzioni civili per diverse ragioni che spingono ad un utilizzo sempre crescente degli FRP in molti paesi.

Tra le motivazioni più importanti sono certamente tutte quelle legate al basso peso dei materiali compositi. Per quanto riguarda invece le proprietà meccaniche non si può parlare di un vantaggio assoluto, ma certamente la possibilità che hanno i materiali compositi di essere progettati su misura in riferimento all'utilizzo che avranno, consente la realizzazione di un materiale con la resistenza desiderata nelle direzioni volute e non in altre in cui sarebbe superflua.

Si ha cioè, con i compositi, la possibilità di progettare prima il materiale e poi il componente, permettendo di raggiungere risultati altrimenti impensabili con l'uso dei materiali tradizionali: un caso certamente di tale tipo è rappresentato dalla realizzazione di ponti o strutture similari a grande luce.

Ma forse la potenzialità più interessante, che deriva dalla possibilità di progettare il materiale su misura, si sfrutta in quei casi in cui il composito viene direttamente a contatto con materiali diversi, come nel ripristino di strutture fatiscenti o nel

restauro di monumenti. Allora la possibilità di intervenire sulla struttura del composito variando opportunamente la direzione delle fibre nelle diverse lamine, permette di variare le caratteristiche elastiche del componente in composito portandole a raggiungere il livello desiderato e, in particolare, portando il materiale composito ad avere lo stesso modulo di elasticità del materiale con cui è a contatto.

Un'altra ragione che risulta di notevole rilievo nell'utilizzo di questi materiali nell'edilizia è certamente data dalla resistenza agli agenti corrosivi che presentano i compositi a matrice polimerica. I comportamenti che possono assumere i materiali compositi sono variabili a seconda della loro costituzione che viene anche in questo caso progettata per l'utilizzo che dovrà avere il materiale. È stato verificato che i problemi corrosivi noti e classicamente determinanti la crisi nei materiali tradizionali, si possono superare con l'utilizzo dei materiali compositi a matrice polimerica.

Bisogna però sottolineare che la valutazione della durabilità effettiva e sperimentale dei compositi nelle diverse condizioni di esercizio non possono essere validate da evidenze sperimentali di lunga durata, ovviamente a causa dei tempi finora ristretti dell'uso di questi materiali per le applicazioni civili.

La resistenza termica è un'altra caratteristica che spinge all'utilizzo dei compositi, nonostante le caratteristiche intrinseche della matrice polimerica. Le proprietà termiche di un composito sono legate a quelle della matrice e quindi naturalmente limitate, però considerando le effettive necessità richieste (conformità a

classi di tolleranza e specifiche di non emissione di fumi tossici) le caratteristiche a tal riguardo presentate da numerosi tipi di resine, permettono la loro utilizzazione in situazioni impensabili fino a qualche anno fa.

Infine osserviamo che i materiali compositi non posseggono caratteristiche magnetiche che ne possano limitare l'uso nei casi in cui i materiali metallici a causa delle loro proprietà magnetiche non sarebbero utilizzabili.

2.1 Applicazione dei materiali compositi nell'edilizia civile

I compositi fibrosi o Fiber Reinforced Polymer -FRP- non rappresentano un'invenzione recente, bensì già da tempo trovano numerose applicazioni in differenti campi dell'ingegneria. Nonostante ciò le prime applicazioni nel campo delle costruzioni non si sono avute se non dopo gli anni '80, sia per l'elevato costo, sia per l'alto contenuto tecnologico dei prodotti, i quali richiedevano condizioni d'uso di laboratorio.

Dal 1985 ad oggi le cose sono profondamente cambiate e, anche nelle costruzioni, l'impiego degli FRP sta progressivamente diffondendosi divenendo la nuova frontiera dell'attuale tecnologia delle costruzioni.

Il Giappone fu il primo paese a credere decisamente negli FRP e destinò una grande quantità di risorse economiche ed

intellettuali in questo settore. L'aver intuito per primi la possibilità di aprire nuovi orizzonti nel campo delle costruzioni ha fatto sì che il Giappone possa vantare oggi una posizione di leadership in questo settore. Negli Stati Uniti la ricerca si è sviluppata leggermente in ritardo, ma grazie alle consistenti esperienze compiute nell'industria spaziale, militare ed aeronautica, ha velocemente recuperato il tempo perduto. Il dipartimento dei trasporti della California fece scalpore quando, nel 1995, decise di investire milioni di dollari nel rinforzo delle pile delle autostrade dello stato con fasciature in composito fibroso, al fine di migliorarne il comportamento sismico.

Oggi tanti stati stanno finanziando progetti di ogni tipo: dal recupero di ponti, ad edifici, a parking garage ed ancora altre applicazioni. In Canada, lo studio in questo settore ha portato allo studio, poi all'applicazione ed infine al monitoraggio di ponti *steel deck free*, dove cioè l'impalcato è assolutamente privo di strutture in acciaio ed in cui quindi gli FRP vengono usati come profili strutturali.

Nel recente passato, anche in Italia si è avuto il diffondersi di differenti tipologie di applicazioni degli FRP nel settore dell'edilizia.

Nelle costruzioni civili il promettente impiego degli FRP copre principalmente tre categorie di funzioni:

1. armatura di materiali tradizionali quali calcestruzzo, muratura e legno;
2. strutture interamente in composito (profili strutturali);

3. rinforzo di elementi strutturali esistenti di varia tipologia e materiale.

2.2 Armatura di materiali tradizionali

Il calcestruzzo è soggetto a processi di deterioramento che tendono a disintegrarlo. Diverse sono state le soluzioni tentate, ma un'alternativa radicale per l'eliminazione della corrosione è rappresentata dalle armature non metalliche, in quanto non corrodibili: le armature in FRP.

L'assenza del fenomeno della corrosione elettrochimica negli FRP, infatti, ne incoraggia l'utilizzo in tali applicazioni innovative.

L'uso di barre d'armatura o di tiranti con questi materiali emerge quale una tecnica tra le più promettenti dell'ingegneria strutturale. Tra le realizzazioni più rilevanti vi sono il ponte di Laurel Lick Bridge installato nel maggio 1997 in West Virginia.



Fig.2.1- Soletta modulare del ponte di Laurel Lick Bridge

Usando barre e tiranti in FRP, i quali a differenza di quelli in acciaio non sono affetti dalla corrosione elettrochimica, molti si aspettano di allungare e migliorare drasticamente la vita delle opere in calcestruzzo.

Gli FRP si candidano quindi quale alternativa all'acciaio come materiale d'armatura, anche se, tale candidatura, deve essere ancora suffragata da ricerche che mettano in luce tutti i riflessi strutturali che in tal modo si originano.

2.3 Profili strutturali

In questa categoria sono dominanti i profili pultrusi: per essi, leggeri, resistenti e sufficientemente rigidi, si prospettano funzioni tipiche della struttura portante intelaiata.

I profilati pultrusi, disponibili in un sagomario del tutto simile a quello per i profili in acciaio, possono essere impiegati in assemblaggi tradizionali o in telai, come travi o colonne.

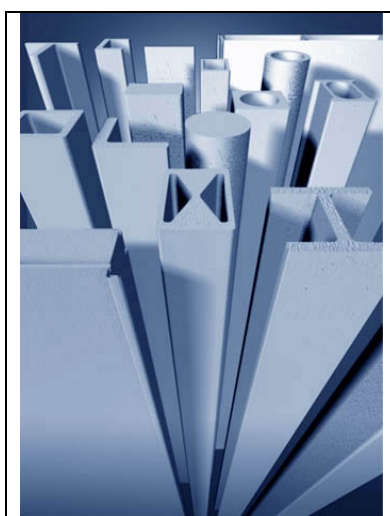


Fig.2.2 Profili pultrusi

Gli FRP presentano però un modulo di elasticità ridotto rispetto a quello dell'acciaio, per cui il progettista strutturale deve prestare particolare attenzione agli aspetti connessi all'elevata deformabilità e, più in particolare, all'instabilità sia globale che locale. Per elementi di solaio o di copertura è dunque utile lavorare con luci non elevate, per contenere le frecce. Le prestazioni strutturali degli elementi pultrusi, sono influenzati dalla geometria dei profili, dalla percentuale e direzione delle fibre, e dal tipo di matrice. Inoltre la presenza di un asse predominante di distribuzione delle fibre continue definisce un asse principale delle prestazioni meccaniche che caratterizza i materiali ortotropi, ed è in tal senso necessario un approccio teorico ben distinto da quello tradizionale.

Gli studi tecnico sperimentali rivolti all'analisi del comportamento strutturale dei profili in materiale composito pultruso sono particolarmente avanzati nei paesi del Nord Europa e negli Stati Uniti, dove peraltro sono state già messe a punto delle prenormative di indirizzo in vista della redazione di specifiche normative tecniche. I primi ponti e le prime unità abitative interamente in composito cominciano a fare le loro apparizioni proprio in questi paesi, un esempio è il "Kolding bridge" realizzato in Danimarca.



Fig.2.3 Kolding bridge

2.4 Rinforzi o ripristini strutturali

L'applicazione dei materiali compositi come rinforzo per il ripristino strutturale di strutture già esistenti rappresenta forse nell'ambito delle applicazioni civili il campo dove ormai gli FRP rappresentano a pieno titolo una realtà. Il rinforzo delle infrastrutture deteriorate o danneggiate vanta, infatti, la maggiore numerosità di applicazioni. La domanda di materiali ad alte prestazioni anche in termini di durabilità e l'esigenza di una riduzione dei costi di esecuzione delle riparazioni possono essere validamente coniugate nell'impiego dei materiali FRP.

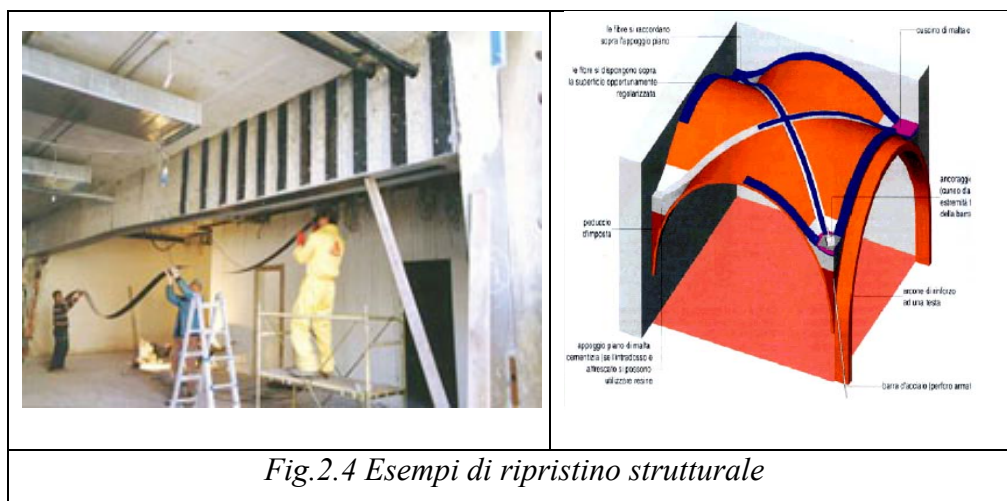


Fig.2.4 Esempi di ripristino strutturale

Si tratta di una tecnica molto sofisticata, nonostante l'apparente estrema semplicità e deve essere appoggiata da un attento e scrupoloso studio di progettazione. Infatti, l'aggiunta di FRP modifica anche sostanzialmente lo stato tensionale della struttura su cui è applicato, questa modifica deve essere perfettamente recepita e controllata dal progettista.

Nelle zone sismiche il miglioramento del comportamento strutturale delle strutture esistenti si consegue spesso con sorprendente efficacia. Si deve considerare l'alto rapporto resistenza/peso che per le strutture sottoposte ad azioni sismiche risulta determinante.

In quest'ambito la tecnologia del *wrapping* (fasciatura) con compositi formati in sito costituisce una vera rivoluzione dell'ingegneria strutturale. Infatti, lo sconfinamento delle colonne e il rinforzo flessionali e a taglio delle travi si consegue con facilità ed efficienza "cinturando" o "placcando" gli elementi strutturali con tessuti impregnati di resina.



Le resine costituiscono la matrice del composito mentre le fibre del tessuto possono essere di varia natura: carbonio, aramide, vetro, o altre fibre minerali. Dosando strati e morfologie del composito si ottengono incrementi notevoli in resistenza.

Mentre il settore del rinforzo strutturale con FRP vanta rapido sviluppo applicativo, tuttavia le metodologie di calcolo non sono del tutto sistemate e raccolte in norme e raccomandazioni.

In particolare, il rinforzo a taglio delle travi di calcestruzzo armato è oggetto di ricerca per quanto riguarda schematizzazioni di calcolo e morfologie di applicazione. Nella quasi totalità di applicazioni il rinforzo è esterno, quindi la trasmissione delle azioni dal composito alla struttura originaria avviene sulla pellicola esterna dell'elemento rinforzato. Nelle travi di calcestruzzo armato si indica con “copriferro” lo spessore esterno di calcestruzzo che deve essere in condizioni di trasmettere le predette azioni. La consistenza del supporto va valutata prima di

ogni intervento e solo se ritenuta adeguata si può procedere all'applicazione. Tornano buone le metodologie di prova non distruttiva per acquisire gli elementi di giudizio. Per murature storiche il discorso si fa particolarmente interessante. Volte e cupole possono ottenere un aiuto di incalcolabile efficacia se placcate con materiale composito quando sono sottoposte ad azione sismica.



Fig.2.6 Esempi di ripristini nell'architettura artistica

In questo ambito l'utilizzo dei materiali compositi è valorizzato ancora di più dalla possibilità di effettuare ripristini e rinforzi strutturali mantenendo inalterata l'estetica della struttura, cosa di notevole rilievo se appunto si pensa a strutture aventi un certo valore artistico. Meccanismi di collasso possono essere impediti con il risultato di abbattere la vulnerabilità intrinseca di questi elementi strutturali.

2.4.1 Sistemi di rinforzo

Nell'ambito del rinforzo strutturale storico degli edifici, i consolidamenti strutturali hanno sempre avuto una grande importanza, poiché sono presidi di sicurezza grazie ai quali la struttura può continuare a vivere espletando le funzioni per cui era stata progettata.

Già in epoca antica si provvedeva quindi a contrastare l'azione delle forze mediante utilizzo di catene, chiavi e opere di cinturazione per gli elementi sottoposti a sovraccarichi, cedimenti o eventi naturali eccezionali, quali per esempio i terremoti.

Questo campionario di rinforzi è tutt'oggi visibile ed in funzione in molte costruzioni in muratura, anche di epoca recente. Si tratta per lo più di dispositivi realizzati in ferro, raramente in legno, e fissati nelle strutture mediante malte o incastri meccanici.

Fino a dieci anni fa non esistevano metodi di rinforzo sostitutivi a questi posti in opera nei secoli precedenti. Le uniche migliorie apportate erano relative solamente alla qualità dei materiali costituenti il dispositivo di rinforzo (spesso acciaio inossidabile in sostituzione del normale ferro acciaiato) e, soprattutto, utilizzati per il loro fissaggio (malte cementizie speciali, resine epossidiche bicomponenti, malte epossicementizie, ecc.) in sostituzione dei leganti idraulici naturali.



Fig.2.7 Esempio di rinforzo tradizionale

Verso la metà degli anni ottanta in Giappone e in U.S.A. si mettono a punto dei sistemi di rinforzo denominati FRP o “compositi”, in cui l’interazione fra una matrice resinosa ed una fibra ad alte prestazioni (come il carbonio) genera un sistema in grado di migliorare le resistenze finali degli elementi trattati se applicato alle strutture. In sintesi, una sorta di tecnica del beton plaqué evoluta e migliorata: sottili e leggeri nastri di fibre di carbonio vengono incollati alle strutture mediante impregnazione in situ di resine. Il metodo soppianta l’ingombrante ed onerosa tecnica tradizionale, che prevedeva la messa in opera di pesanti strutture in acciaio mediante connessioni meccaniche e tassellaggi chimici.

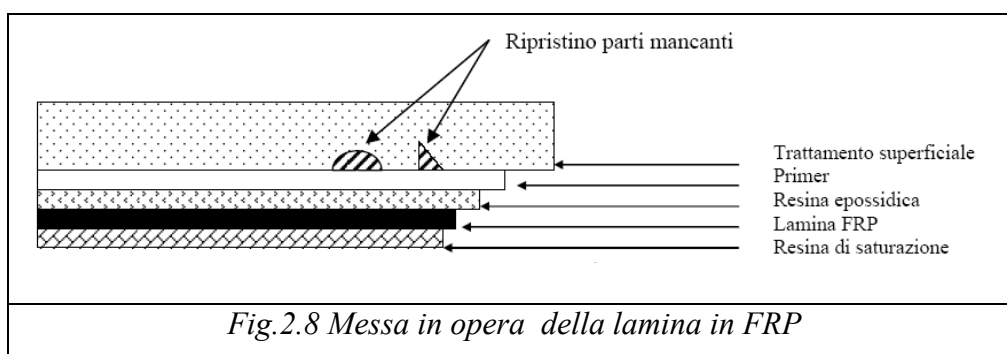


Fig.2.8 Messa in opera della lamina in FRP

La tecnica dei rinforzi strutturali FRP (Fiber Reinforced Polymer) si diffonde rapidamente nel mondo dei recuperi delle infrastrutture e delle opere in cemento armato, sia sulla spinta della convenienza economica, sia sull'effettiva efficacia della tecnologia, duramente messa alla prova anche dai potenti sismi Giapponesi e Americani della costa Pacifica alla fine degli anni '90.



Fig.2.9 Esempio di ripristino di una struttura in cemento armato

Sulla scorta di queste esperienze anche in Italia, intorno al '95, compaiono le prime applicazioni: si tratta per lo più di riparazioni di strutture danneggiate da impatti accidentali (ponti e viadotti), o il cui stato di degrado necessita di rinforzi che vadano oltre la normale ricostituzione della sezione resistente mediante utilizzo di malte speciali.

Il patrimonio edilizio italiano è da sempre largamente costituito da strutture in muratura e, ancora una volta, fu l'evento sismico che colpì le zone delle Marche e dell'Umbria nel 1997 a portare alla luce le potenzialità dei sistemi di rinforzo composito: la grave emergenza aveva colpito una delle zone del paese più densamente costruite con tecniche tradizionali, danneggiando seriamente anche opere d'arte di valore storico artistico mondiale. Anche col contributo del mondo accademico, furono rapidamente messe a punto tecniche di intervento e capitolati ad hoc, che consentirono di travasare le brillanti esperienze realizzate nelle strutture in calcestruzzo, nelle applicazioni su muratura provate dal sisma, aprendo un nuovo capitolo della storia della scienza delle costruzioni.

2.4.2 Limiti di utilizzo dei sistemi di rinforzo composito tradizionali nelle strutture in muratura

La tecnica di rinforzo mediante utilizzo di fibre ad alta resistenza impregnate in una matrice epossidica presenta alcune caratteristiche limitanti, proprie della tipologia del materiale. Infatti, le resine epossidiche utilizzate per questa funzione (di tipo bicomponente) obbligano le maestranze di cantiere ad alcune precauzioni di fondamentale importanza per la buona riuscita dell'intervento di rinforzo. Esse sono:

- 1. perfetta planarità delle superfici delle strutture da rinforzare**

L'esigenza nasce dalla necessità di far lavorare le fibre di carbonio potendole disporre ortogonalmente rispetto alla direzione degli sforzi, affinché possono offrire la massima resistenza possibile in funzione delle caratteristiche proprie del materiale. Questa condizione viene normalmente rispettata riportando a spessore (più o meno consistente) stucchi epossidici, i quali hanno però lo svantaggio di avere caratteristiche meccaniche molto diverse rispetto alle strutture in muratura alle quali devono aderire. Se gli spessori sono consistenti (cosa non rara vista la tipologia delle costruzioni in muratura), diventa più probabile la formazione di una cospicua sezione resistente con caratteristiche meccaniche molto diverse rispetto a quelle della muratura su cui aggrappano e, per conseguenza, con tensioni e dinamiche di movimento molto differenti. Si crea inoltre una nuova superficie di contatto tra muratura e rinforzo (stucco + resina), che aumenta la possibilità dei distacchi all'interfaccia delle superfici.

2. influenza della temperatura

Le reazioni di catalisi della resina epossidica sono sempre fortemente influenzate dalla temperatura ambientale e della struttura della stessa. Climi caldi con temperature superiori a 25-30°C accelerano notevolmente la reazione di catalisi, facendo troppo rapidamente indurire la resina ed impedendone la messa in opera. Al contrario, climi particolarmente freddi con valori

inferiori a 5°C non consentono di innescare la reazione di catalisi della resina e, per conseguenza il suo indurimento.

3. totale assenza di umidità nella struttura

L'indurimento della resina viene compromesso dalla presenza di acqua nella struttura, poiché questa impedisce il comportamento della normale reazione di catalisi dei due componenti che formano la miscela. Per questo motivo la struttura da sottoporre a rinforzo deve essere completamente asciutta ed eventualmente protetta da precipitazioni atmosferiche improvvise.

Il fenomeno della presenza di umidità è particolarmente frequente nelle strutture in muratura, anche a causa della porosità intrinseca dei materiali (laterizi o lapidei) e dei leganti utilizzati per collaborare. Questo aspetto è particolarmente sentito nella stesura della mano di Primer, che viene applicata prima dell'applicazione vera e propria del rinforzo composito (matrice più fibra).

Il Primer, che ha funzione di ponte chimico di aggrappo fra la struttura e il rinforzo composito, è costituito da una resina epossidica bicomponente particolarmente fluida, quindi in grado di penetrare in profondità attraverso i capillari della superficie, e la presenza di acqua all'interno dei medesimi capillari impedisce la penetrazione della resina, nonché il suo indurimento.

4. utilizzo di mano d'opera specializzata

La posa dei sistemi di rinforzo composito tradizionale, per quanto più economica e vantaggiosa delle tecniche tradizionali di placcaggio e confinamento, rimane pur sempre un'operazione da compiersi mediante utilizzo di manodopera specializzata, in grado cioè di realizzare, a regola d'arte e in tempi brevi, rinforzi strutturali compositi che corrispondano alle prescrizioni del progettista.

5. utilizzo dei dispositivi di protezione individuale

Mentre la fibra di carbonio può essere maneggiata senza particolari cautele, essendo chimicamente inerte, le resine necessarie al suo incollaggio (Primer e Resine adesive) sono prodotti tossico-nocivi per ingestione e contatto diretto con la pelle, e devono quindi essere trattati indossando guanti in lattice, tute di protezione e occhiali protettivi per eventuali percolazioni accidentali.

6. degrado totale degli attrezzi di lavoro

Per miscelare e applicare le resine si utilizzano contenitori puliti, pennelli o rulli nuovi, e misurini graduati utili per ottenere miscele precise dei due componenti della resina. Trascorso il tempo di utilizzo della resina miscelata (pot life), questa inizia a fare presa attraverso una reazione esotermica irreversibile che coinvolge anche gli attrezzi utilizzati per prepararla e applicarla. Eventuali tracce di resina non indurite possono essere rimosse da vestiti e oggetti comuni con il solvente alla nitro, ma è impossibile pulire adeguatamente gli attrezzi, essendo la sostanza

molto viscosa. Ciò comporta il frequente rinnovo totale degli attrezzi (specie dei pennelli e dei rulli) durante la medesima applicazione.

7. resistenza al fuoco

La resina epossidica non è in grado di resistere a temperature superiori a 80-100°C, valore oltre il quale si liquefa facendo venire meno l'adesione della fibra di carbonio sulla struttura. Ne consegue che le strutture rinforzate con sistemi compositi FRP, se esposte al pericolo potenziale del fuoco, devono essere predisposte con impianti antincendio e rivestimenti resistenti.

8. parziale irreversibilità dell'intervento

La resina epossidica con funzione di primer, che viene stesa prima dell'applicazione del composito per ottimizzare l'aggrappo alla struttura, ha un forte potere impregnante penetrando nella struttura con uno spessore di circa 10 mm.

Non è quindi completamente veritiero considerare i sistemi compositi tradizionali come dei rinforzi reversibili, là dove la reversibilità dell'intervento è un valore importante per la tipologia e il pregio dell'edificio su cui viene realizzato.

2.5 Fibre di acciaio per l'armatura del calcestruzzo

Inizialmente le fibre di acciaio sono state introdotte per migliorare il comportamento del materiale nei confronti di fenomeni quali ritiro o fessurazione, senza però sfruttarne la

valenza strutturale. Recentemente sono apparse le prime applicazioni strutturali in cui le fibre di acciaio vengono utilizzate per l'armatura di prefabbricati in calcestruzzo, alternativa parziale o totale all'armatura tradizionale caratterizzata dalla presenza delle reti metalliche posizionate all'interno del calcestruzzo.

Una forma complicata, un gran numero di aperture e cavità, muri sottili ed altro ancora possono causare dei problemi ad una armatura di tipo tradizionale, ed inoltre un elevato costo del lavoro dovuto alla posa del calcestruzzo in quanto quest'ultimo ha difficoltà a posizionarsi perchè impedito da una elevata concentrazione di armatura. Le gabbie di armatura costano molto e richiedono, in fase di produzione, un largo uso di manodopera per ogni fase del lavoro: pianificazione e disegno, misurazioni, taglio, saldatura, distanziamento, montaggio, controllo, un magazzino con un grande stock di barre e reti, sfridi inevitabili e tutte le difficoltà inerenti. In tutti questi casi la risposta risiede in una drastica semplificazione del sistema di armatura.

Per questo si è pensato al calcestruzzo armato con fibre di acciaio che presenta diversi vantaggi: maggiore duttilità ed elevata resistenza al carico, efficace controllo delle fessurazioni, curabilità, rapidità e facilità di applicazione, efficacia ed economicità della soluzione.

Tali fibre sono prodotte in diversi modi: da filo trafilato, da lamiera tagliata o ancora da altre fabbricazioni. Il materiale più utilizzato, per la produzione di tali fibre, è l'acciaio a basso contenuto di carbonio in vergelle di prima qualità per assicurare

un'elevata resistenza a trazione e minime tolleranze dimensionali. Viene, però, utilizzato anche acciaio ad alto contenuto di carbonio oppure acciaio inox; presentano estremità opportunamente sagomate che si deformano lentamente durante la fase di distacco; esse possono essere distribuite nell'impasto sia sciolte singolarmente che incollate in placchette .

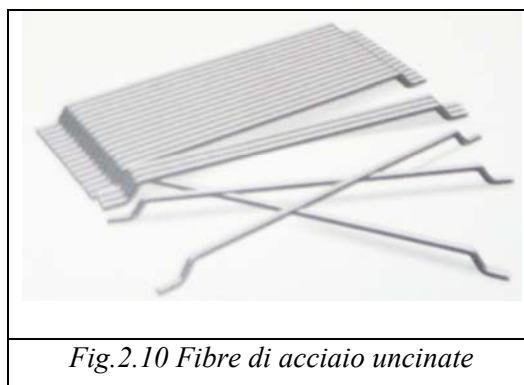


Fig.2.10 Fibre di acciaio uncinato

Tali fibre impediscono la formazione di fessurazioni assorbendo le tensioni della fessura sviluppatesi lungo tutta l'ampiezza, oppure, se le fessure si formano comunque, ne bloccano la crescita ulteriore. Le fibre in acciaio si avvalgono delle proprietà relative ad un rinforzo multidirezionale. Infatti l'apertura di una fessura nella matrice cementizia mobilita le fibre presenti nella zona interessata. Una conseguenza diretta è la ridottissima vulnerabilità del calcestruzzo riguardo ai danni provocati da urti e collisioni, infatti, per via dell'elevato contenuto di fibre in acciaio la coesione del calcestruzzo aumenta moltissimo e la resistenza agli urti è duplicata.

Il rinforzo delle fibre in acciaio serve a mantenere la capacità portante del calcestruzzo anche dopo la sua fessurazione. In altri

termini, di norma il calcestruzzo ordinario è fragile mentre il calcestruzzo fibrorinforzato con fibre di acciaio è duttile.

Le prestazioni delle fibre sono direttamente influenzate tanto dal dosaggio (percentuale in peso o in volume) che dalle caratteristiche fisico- meccaniche delle fibre stesse (resistenza alla rottura, lunghezza, diametro, forma dell'ancoraggio).

Il parametro fondamentale per definire il livello della prestazione fornita dalle fibre è il rapporto fra lunghezza e diametro (l/d) in quanto più è elevato questo rapporto, migliori sono le prestazioni; questo fatto può tuttavia causare il problema della produzione di grumi durante l'immissione nell'impasto e la miscelazione dello stesso, inoltre può essere causa di bloccaggi e di rotture della macchina ma anche motivo di inevitabile riduzione della qualità del calcestruzzo. Per tali motivazioni è necessario agire sulla omogeneità dell'impasto.

L'unico grande aspetto negativo di tali fibre di acciaio è la corrosione delle stesse. Per ridurre al minimo tale aspetto vengono utilizzate tecniche di rifinitura superficiale, quindi vengono zincate, ossia rivestite di zinco.

Capitolo 3

Aspetti normativi

La realizzazione del rinforzo su strutture murarie, ottenuta mediante l'impiego di una malta cementizia fibrorinforzata e di un tessuto in carbonio, richiede una procedura di intervento supportata da una adeguata progettazione e da una posa in opera eseguita da personale specializzato.

L'aggiunta di un rinforzo su di una struttura esistente modifica lo stato tensionale del supporto sul quale viene applicato; per questo motivo l'intervento deve, in ogni caso, essere perfettamente controllato dal progettista.

Per tali ragioni la progettazione deve essere accompagnata da una accurata indagine sia sulla qualità dei materiali impiegati, sia sulle caratteristiche del supporto sul quale si deve operare.

Si ricorda che nella parte generale del D.M. 9/1/96 al punto 5, è scritto: *"Nella progettazione si possono adottare metodi di verifica e regole di dimensionamento diverse da quelli contenuti nelle presenti norme tecniche, purché fondati su ipotesi teoriche e risultati sperimentali scientificamente comprovati e purché sia comprovata una sicurezza non inferiore a quella qui prescritta"*.

Nel D.M. 16/06/96 al punto C.9.3.2. *"Provvedimenti tecnici di adeguamento o di miglioramenti intesi ad aumentare la resistenza strutturale"*, secondo capoverso, si legge:

“Possono usarsi anche tecniche di intervento non ivi esplicitamente menzionate, purché risultino, sulla base di adeguata documentazione, di eguale efficacia”.

Nello stesso Decreto, al punto C.9.4. *“Collaudo degli interventi di adeguamento”* si legge:

“Il collaudo, da eseguirsi in corso d’opera, deve tendere ad accertare che la realizzazione degli interventi sia avvenuta conformemente alle prescrizioni progettuali. Il collaudo deve essere basato sulle risultanze di saggi e di prove sia in situ che su campioni, in laboratorio”.

Sostanzialmente, quindi, in Italia è ammessa, almeno in linea di principio, la libera progettazione, purché sia fondata su basi scientificamente corrette e sia corredata da verifiche sperimentali.

L’approccio della *“progettazione assistita dalla sperimentazione” (design by testing)* è la forma più appropriata per la progettazione d’interventi di rinforzo, dove i parametri in gioco sono molteplici ed il modello di calcolo non può essere costruito senza tenere in considerazione la particolare struttura su cui si interviene.

Questa situazione si rende ancor più necessaria qualora s’impieghino anisotropi come i tessuti in FRP, cioè materiali che presentano elevate prestazioni meccaniche nella direzione delle fibre, ma prestazioni mediocri nelle altre direzioni di carico.

3.1 Quadro normativo

Nell'ultimo decennio, il crescente interesse per l'utilizzo dei materiali compositi nel ambito dell'ingegneria civile, ha spinto gruppi e commissioni internazionali ad una fitta produzione di codici, ordinanze e raccomandazioni specificatamente predisposte per l'impiego di materiali "non convenzionali".

Si possono citare a tal proposito le regole progettuali elaborate e pubblicate su appositi bollettini dal *fib* Task Group 9.3, il comitato istituito a livello europeo nel 1998, oppure i bollettini dell'American Concrete Institute (ACI) che hanno l'intento di fornire nuove linee guida per il progetto e la costruzione di strutture in cemento armato rinforzato con FRP.

Un ulteriore contributo in materia è stato fornito dall'European Committee for Standardization che ha pubblicato nuove regole di progettazione e rinforzo con l'impiego degli FRP nell'Eurocode 8 "*Design of structures for earthquake resistance*" Part 3 "*Assessment and retrofitting of buildings*", Draft n°7 January 2003.

In Italia l'ordinanza n°3274 del maggio 2005 riguardante le norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici, introduce al punto 11.3.3.3 l'uso di FRP nel rinforzo sismico di elementi in c.a. e rimanda, in modo esplicito, per le verifiche di sicurezza alle istruzioni del CNR DT 200-2004.

3.2 Il documento tecnico italiano: CNR-DT 200/2004

Scopo delle Istruzioni del CNR-DT 200/2004 è quello di fornire, nell'ambito delle attuali Norme vigenti, un documento orientativo per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento strutturale mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati.

Le Istruzioni, per loro genesi e natura, non sono infatti delle norme cogenti ma rappresentano esclusivamente un aiuto per i tecnici a filtrare con discrezione la ponderosa bibliografia, nazionale ed internazionale, che la letteratura specifica mette a disposizione, lasciando comunque ad essi la responsabilità finale delle scelte operate.

Il documento tratta dei seguenti argomenti:

- Materiali;
- Concetti basilari del rinforzo con FRP e problematiche speciali;
- Rinforzo di strutture di c.a. e di c.a.p.;
- Rinforzo di strutture murarie.

Nell'ambito del rinforzo delle strutture di c.a. e di c.a.p. e di quelle murarie sono inoltre fornite specifiche indicazioni concernenti le costruzioni in zona sismica, in linea con i più recenti orientamenti recepiti nelle Normative nazionali ed internazionali.

La trattazione del primo argomento, comprendente una puntuale rassegna dei vari pregi, come anche dei difetti, presentati dai materiali polimerici, è affrontata con un taglio

didattico ed include un'Appendice (Appendice A) nella quale sono presentate alcune nozioni di natura meccanica, ritenute basilari per un utilizzo consapevole dei materiali compositi in campo strutturale. In essa sono evidenziate le differenze peculiari che tali materiali presentano rispetto agli usuali materiali da costruzione di tipo isotropo, con particolare riguardo ai legami costitutivi ed alle verifiche di resistenza.

Gli altri argomenti sono impostati secondo lo stile usuale dei documenti tecnici pubblicati dal CNR e recanti istruzioni in campo strutturale. Per essi viene seguito l'approccio, ampiamente condiviso, degli Eurocodici: le diverse proposizioni sono distinte in *Principi e Regole di Applicazione*; ciascuna proposizione è contraddistinta da un numero d'ordine; i principi sono contrassegnati dall'ulteriore etichetta (P).

Solo a scopo di completezza, si ricorda che i primi comprendono:

- *affermazioni generali e definizioni, a carattere meccanico-strutturale, universalmente condivise;*
- *esigenze riconosciute e/o modelli analitici accreditati presso la comunità tecnico-scientifica, la cui valenza è universalmente giudicata prioritaria rispetto ad eventuali alternative, salvo esplicito avviso contrario;*

mentre le seconde consistono in:

- *procedure a validità generalmente riconosciuta, che seguono i Principi e ne soddisfano le esigenze.*

Il documento comprende altre quattro Appendici:

Appendice B, contenente un approfondimento sulle modalità di rottura per delaminazione e sul legame di aderenza tra rinforzo di FRP e substrato di calcestruzzo;

Appendice C, sulla valutazione della resistenza di progetto a pressoflessione di pilastri di c.a. rinforzati con FRP;

Appendice D, su alcuni argomenti relativi al legame costitutivo del calcestruzzo confinato;

Appendice E, contenente alcuni esempi numerici relativi al rinforzo con FRP di membrature di c.a..

3.3 Rinforzo di strutture murarie

Nel documento del CNR viene trattato solamente il rinforzo delle strutture in muratura con l'utilizzo di FRP. I principi e le regole di applicazione però valgono anche per il tipo di rinforzo che intendiamo realizzare.

3.3.1 Oggetto ed ambito di applicazione

Oggetto del presente capitolo sono le regole per il dimensionamento e la verifica di elementi strutturali murari rinforzati per il tramite di FRP.

L'intervento di rinforzo ha lo scopo di conseguire, prioritariamente, per i singoli elementi strutturali e per l'intera costruzione un incremento di resistenza nei confronti delle azioni

sollecitanti e, quando possibile, un aumento dei valori degli spostamenti esibiti all'atto del collasso.

3.3.2 Interventi di restauro su strutture di interesse storico e monumentale

Qualora il rinforzo strutturale riguardi costruzioni di interesse storico o monumentale, si richiede una specifica giustificazione sull'indispensabilità, improrogabilità e compatibilità dell'intervento con le teorie del restauro.

3.3.3 Criteri per il progetto del consolidamento strutturale

Gli interventi di rinforzo oggetto delle presenti Istruzioni consistono nell'applicazione di lamine, tessuti, reti e barre di FRP sugli elementi strutturali della costruzione, per adesione o mediante dispositivi meccanici di ancoraggio. La suddetta applicazione può avvenire sulle superfici esterne della muratura (paramenti murari) o in alloggiamenti e scanalature realizzate all'interno della muratura stessa.

L'inserimento dei rinforzi è motivato dalle seguenti ragioni:

- trasmissione di sforzi di trazione all'interno di singoli elementi strutturali o tra elementi contigui (rinforzi a flessione, taglio, ecc.);

- collegamento tra elementi che collaborano a resistere all'azione esterna (catene di volte e di pareti, connessioni tra pareti ortogonali, ecc.);
- irrigidimento di solai nel proprio piano per conseguire un funzionamento a diaframma rigido;
- limitazione dell'apertura di fessure;
- confinamento di colonne al fine di incrementare la resistenza del materiale.

La progettazione degli interventi di rinforzo deve essere generalmente mirata ad assicurare uno stato di trazione nei rinforzi di FRP.

Infatti, i rinforzi di FRP soggetti a compressione non sono generalmente in grado di incrementare le prestazioni delle murature, in quanto, a parità di contrazione, la risultante degli sforzi di compressione a carico della muratura prevale solitamente di gran lunga su quella a carico del composito fibrorinforzato, a causa della notevole differenza di area tra la muratura compressa ed il rinforzo. Inoltre, i rinforzi compressi sono soggetti a possibile delaminazione per instabilità locale.

Per le strutture murarie rinforzate con FRP e soggette a sollecitazioni cicliche di trazione e compressione, quali quelle causate da eventi sismici e da variazioni termiche, l'adesione muratura- FRP può deteriorarsi notevolmente nel corso della vita della struttura.

A tal riguardo potrebbe essere necessario inserire il rinforzo in intagli atti a prevenire l'instabilità locale ovvero applicare dispositivi meccanici di connessione.

Nella progettazione del consolidamento deve essere riposta la massima cura nell'estendere i rinforzi di FRP fino alle zone di muratura compresse.

L'applicazione di rinforzi di FRP deve essere effettuata su elementi strutturali di adeguate proprietà meccaniche. Qualora la muratura si presenti danneggiata, disomogenea o viziata da qualsiasi difetto che precluda la corretta trasmissione degli sforzi mutui con il rinforzo, si deve procedere al suo preconsolidamento secondo tecniche tradizionali. Inoltre, attese le varieghe tipologie di rinforzo disponibili sul mercato (fibre di vetro, di carbonio, aramidiche), la scelta del sistema a base di FRP deve tener conto delle proprietà fisiche e chimiche della muratura allo scopo di scegliere la soluzione più idonea.

Quando si applicano tessuti o lamine di FRP su superfici murarie, si deve tener presente la completa assenza di traspirabilità dei materiali compositi. Per tale motivo gli interventi di rinforzo strutturale eseguiti con tali materiali non devono, di norma, interessare estese superfici del paramento murario al fine di preservare un'adeguata traspirabilità del sistema.

3.3.4 Articolazione degli interventi

L'intervento di rinforzo si inserisce nell'ambito di un progetto complessivo di consolidamento strutturale. Il consolidamento, sia esso adeguamento o miglioramento

nell'accezione precisata dalla Normativa vigente, può essere realizzato:

- incrementando la resistenza di pannelli, archi o volte;
- cerchiando colonne allo scopo di incrementarne la resistenza a compressione e la duttilità;
- riducendo la spinta di strutture spingenti;
- trasformando elementi non strutturali in elementi strutturali, mediante conferimento di rigidità e capacità resistente;
- rafforzando e irrigidendo strutture orizzontali non spingenti; incatenando o fasciando lateralmente l'edificio all'altezza degli impalcati o della copertura.

3.3.5 Comportamento della struttura

La muratura è caratterizzata da comportamento non isotropo e non lineare anche per valori ridotti delle deformazioni.

Il legame tensione-deformazione può variare in modo più che significativo da muratura a muratura in funzione della composizione della stessa, ovvero della tipologia e dell'aggregazione degli elementi resistenti artificiali o naturali e della tipologia della malta di allettamento.

Sottoposto a prove di carico monoassiali, il materiale muratura presenta un comportamento fragile a trazione contraddistinto da valori della resistenza di gran lunga inferiori a quelli della resistenza a compressione.

Un'ipotesi di lavoro largamente accettata è quella di considerare nulla la resistenza a trazione della muratura; tale

ipotesi è confortata, soprattutto per gli edifici esistenti (antichi e monumentali), dall'aleatorietà della resistenza a trazione e dal suo progressivo decadimento nel tempo.

Per quanto riguarda il comportamento a compressione, le esperienze di laboratorio dimostrano che, nella sua forma più completa, il legame costitutivo della muratura è:

- sostanzialmente lineare per bassi valori della contrazione;
- non lineare crescente fino ad un valore di picco della tensione di compressione;
- non lineare decrescente, con un ramo (*softening*) lungo il quale la resistenza del materiale decresce più o meno rapidamente in funzione della tipologia della muratura.

Il comportamento a compressione dipende inoltre dal confinamento trasversale della muratura: incrementando la compressione trasversale si ottiene un miglioramento della resistenza e della duttilità a compressione del materiale.

La resistenza a taglio della muratura dipende dalla compressione agente, essendo dovuta sostanzialmente, per ogni tessitura, alla coesione interna del materiale ed al fenomeno fisico dell'attrito.

I valori caratteristici delle resistenze sono:

- a compressione verticale, f_{mk} ;
- a compressione orizzontale, f_{mk}^h ;
- a taglio, f_{vk} .

Essi devono essere determinati mediante idonee prove sperimentali su campioni di muro, secondo le modalità definite dalla Normativa vigente.

Come valore orientativo della f_{mk}^h può assumersi il 50% della f_{mk} .

I valori delle proprietà meccaniche di progetto della muratura sono calcolati dividendo i valori caratteristici per un opportuno coefficiente parziale del materiale, $\gamma_m = \gamma_M$, ed inoltre per un opportuno coefficiente parziale relativo al modello di resistenza, γ_{Rd} , come definiti, rispettivamente, nella Normativa vigente e nelle presenti Istruzioni.

3.3.6 Valutazione della resistenza alla delaminazione

Nel rinforzo di paramenti murari mediante applicazione di lamine o tessuti di materiale composito il ruolo dell'aderenza tra muratura e composito è di grande importanza, poiché la crisi per perdita di aderenza del rinforzo è un modo di rottura fragile e, quindi, indesiderabile.

Infatti, in un dimensionamento strutturale che segua il criterio di gerarchia delle resistenze, il meccanismo di rottura fragile per perdita di aderenza del rinforzo non dovrebbe mai precedere l'entrata in campo inelastico per compressione della muratura stessa. Nel caso si adottino speciali dispositivi di ancoraggio del rinforzo alla muratura, la rottura per delaminazione è accettata purché si tenga conto della variazione dello schema resistente.

Tenuto conto della notevole varietà di composizioni murarie esistenti, quali la muratura realizzata con blocchi artificiali di laterizio o calcestruzzo, la muratura con blocchi di pietrame squadrato o non squadrato, la delaminazione si manifesta attraverso interazioni tra materiali differenti.

Peraltro, nel caso di murature con paramenti irregolari, allo scopo di realizzare un piano di posa adeguato per il rinforzo, si procede di norma all'apposizione di uno strato di malta di regolarizzazione sul quale effettuare l'incollaggio.

In definitiva uno stesso rinforzo, lungo il suo sviluppo, può risultare connesso a materiali differenti, caratterizzati da diverse proprietà di interfaccia.

Qualora la resistenza dell'adesivo utilizzato per l'applicazione del rinforzo sia più elevata della resistenza del materiale su cui è apposto il rinforzo, la perdita di aderenza tra composito e muratura avviene per decoesione di uno strato superficiale del mattone o del blocco di pietra o della malta.

Nel caso di rinforzi a rete con elevata superficie specifica e montaggio mediante matrici cementizie, il distacco può avvenire anche tra la rete stessa e lo strato di adesione.

La delaminazione dal paramento murario di lamine o tessuti applicati a strisce isolate per il rinforzo secondo direttrici rettilinee può essere classificata secondo due modalità principali: delaminazione di estremità del rinforzo (*plate end debonding*), delaminazione a partire dai giunti di malta o da fessure trasversali nella muratura (*intermediate crack debonding*).

In una muratura rinforzata e soggetta ad uno stato tensionale che generi trazione nel rinforzo, sia alle estremità di quest'ultimo sia nelle zone di esso a cavallo di una fessura, l'interfaccia FRP-muratura è sottoposta ad elevati sforzi tangenziali, localizzati su lunghezze dell'ordine di 50÷200 mm a partire dalla sezione di discontinuità.

La forza di delaminazione si riduce nei casi di sollecitazione composta, ovvero in presenza di sforzi agenti in direzione ortogonale all'asse del rinforzo. In particolare, nel caso di rinforzi applicati su superfici curve o quando la rigidezza flessionale della lamina è elevata, si possono avere significativi sforzi di trazione in direzione normale all'interfaccia (*peeling*) che riducono la forza di ancoraggio trasmissibile. Inoltre, nel caso di tessuti applicati sul paramento murario con fibre inclinate rispetto alla direzione ortogonale alla fessurazione, si verifica una concentrazione delle tensioni interattive a cavallo delle fessure dovuta al possibile spostamento relativo, responsabile della discontinuità dell'interfaccia.

La delaminazione a taglio, che si verifica in corrispondenza della parte terminale del rinforzo (ancoraggio), può essere accompagnata dall'asportazione di un consistente strato di mattone (*ripoff failure*), soprattutto quando le tensioni tangenziali di estremità si associano a sforzi normali di trazione. Tale modalità di crisi si manifesta con la formazione di fessure dovute alla diffusione dello sforzo di ancoraggio, cui possono associarsi, nel mattone, trazioni tali da provocarne la frattura.

3.3.7 Taglio

La resistenza a taglio di un pannello murario consolidato per il tramite di un sistema di rinforzi applicati simmetricamente sulle due superfici esterne deriva dalla combinazione di due meccanismi resistenti: da un lato, in presenza di compressione, la muratura trasmette taglio per attrito, dall'altro la presenza degli elementi resistenti a trazione attiva nel pannello un traliccio reticolare che trasmette taglio per equilibrio interno.

Di norma l'incremento della resistenza a taglio del pannello richiede che siano disposti sulla parete sia rinforzi capaci di assorbire la trazione generata dalla flessione, sia rinforzi disposti nella direzione del taglio, atti a generare il comportamento a traliccio. In caso di assenza di rinforzi di FRP disposti per la pressoflessione, il rinforzo del pannello a taglio può essere ottenuto applicando i rinforzi secondo le diagonali del pannello.

3.3.8 Obiettivo della progettazione del rinforzo

Gli interventi di rinforzo con FRP possono essere effettuati su strutture murarie in zona sismica che non soddisfino i requisiti di sicurezza previsti dalla Normativa vigente nei confronti di uno o più stati limite.

Questa parte del documento recepisce le indicazioni della Normativa vigente, nonché le indicazioni fornite nei codici e nella letteratura più recenti in tema di costruzioni antisismiche, relativamente ai seguenti temi:

- valutazione della sicurezza sismica;
- requisiti di sicurezza (stati limite da verificare);
- livelli di protezione antisismica (intensità dell'azione sismica associata);
- metodi di analisi;
- criteri di verifica;
- caratteristiche dei materiali da impiegare nelle verifiche di sicurezza.

La scelta del tipo e dell'estensione dell'intervento con FRP deriva dai risultati della fase di valutazione della sicurezza sismica della costruzione, tenendo conto degli aspetti sotto elencati.

- Le murature di qualità insufficiente a sopportare le azioni verticali ed orizzontali cui sono sottoposte vanno adeguatamente consolidate o sostituite.
- Le pareti confluenti in martelli murari o in spigoli devono essere opportunamente collegate.
- Occorre rendere efficaci i collegamenti inadeguati tra solai e pareti o tra copertura e pareti.
- Le spinte di coperture, archi e volte devono essere assorbite da idonei elementi strutturali.
- I solai devono essere opportunamente irrigiditi nel proprio piano allo scopo di assicurare, mediante il loro collegamento alle pareti, il trasferimento delle competenti azioni orizzontali alle pareti disposte nella direzione del sisma e di costituire un vincolo per le pareti sollecitate da azioni ortogonali al proprio piano.

- Gli elementi a forte vulnerabilità sui quali non sia possibile intervenire vanno di regola eliminati.
- Nel caso di edifici fortemente irregolari (in termini di resistenza e/o rigidità) non è possibile in linea di principio correggere tale sfavorevole situazione mediante interventi con FRP, anche se è possibile, intervenendo in tal modo su un ridotto numero di elementi, conferire una maggiore regolarità in resistenza.
- Gli interventi con FRP volti a migliorare la duttilità locale (cerchiatura di pilastri) sono sempre opportuni.
- L'introduzione di rinforzi locali con FRP non deve ridurre la duttilità globale della struttura.

Gli interventi con FRP hanno generalmente lo scopo di:

- rinforzare, sostituire o ricostruire in tutto o in parte alcuni elementi (interventi selettivi);
- modificare l'organismo strutturale attraverso il collegamento fra elementi strutturali diversi.

Il progetto dell'intervento con FRP deve comprendere le seguenti attività:

- scelta motivata del tipo di intervento;
- scelta delle tecniche e/o dei materiali;
- dimensionamento preliminare dei rinforzi;
- analisi strutturale che tenga conto delle caratteristiche della struttura post-intervento;
- verifiche della struttura post-intervento eseguite sugli elementi esistenti, modificati e nuovi (per gli elementi esistenti, riparati o rinforzati, le verifiche devono essere eseguite in accordo con

quanto indicato nelle presenti Istruzioni; per gli elementi di nuova costruzione le verifiche devono essere condotte in accordo con le prescrizioni normative valide per tali strutture). In zona sismica l'applicazione dei rinforzi su strutture murarie è principalmente finalizzato al raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- incremento della resistenza a flessione e taglio di pannelli murari assicurando la trasmissione di sforzi di trazione all'interno di singoli elementi o tra elementi contigui;
- eliminazione di spinte e forze applicate ortogonalmente ai paramenti murari;
- collegamento tra elementi che collaborano a resistere alle azioni orizzontali in modo da ottenere un comportamento scatolare della costruzione;
- irrigidimento di solai nel proprio piano per ottenere un funzionamento a diaframma rigido;
- limitazione dell'apertura di fessure per migliorare la dissipazione di energia;
- confinamento di colonne per incrementare la resistenza e la duttilità del materiale.

La strategia d'intervento con FRP deve essere ispirata al principio di incrementare la resistenza degli elementi sottodimensionati, con l'intento di conseguire contestualmente una maggiore regolarità strutturale e l'eliminazione di possibili modi di collasso locale di singole pareti o elementi strutturali.

L'efficienza sismica dell'intervento progettato può essere stimata dall'incremento di spostamento orizzontale a collasso derivante dall'applicazione del rinforzo.

3.3.9 Installazione, monitoraggio e controllo

Il funzionamento ottimale di un rinforzo strutturale di materiale composito è subordinato a diversi fattori. Tra questi, oltre quelli già richiamati nei precedenti capitoli, rientrano la preparazione del substrato su cui il rinforzo è applicato e la sua messa in opera, che sono oggetto del presente paragrafo.

L'incidenza di ciascuno di questi fattori varia a seconda che ci si riferisca ad applicazioni “per aderenza” (rinforzo a flessione o a taglio) o applicazioni “per contatto” (confinamento passivo di colonne o pilastri di muratura). A titolo esemplificativo, possono essere omesse alcune verifiche relative alla qualità del substrato in casi in cui la geometria del rinforzo ne garantisca il funzionamento intrinseco (per esempio nel caso di applicazioni in avvolgimento come le fasciature chiuse di confinamento) o siano previsti appositi elementi di ancoraggio collaudati indipendentemente.

Una volta che l'intervento sia stato realizzato è necessario procedere al suo controllo ed, in seguito, al suo eventuale monitoraggio nel tempo mediante prove non distruttive o parzialmente distruttive.

Il controllo delle condizioni del substrato coinvolge aspetti legati alla valutazione del grado di deterioramento del paramento murario ed alla rimozione e ricostruzione della muratura ammalorata, con eventuali provvedimenti di pulizia ed asportazione di parti degradate per umidità, per presenza di microvegetazione o alterazione dei materiali lapidei o di laterizio.

Prima dell'applicazione del rinforzo è necessario verificare le caratteristiche del substrato eseguendo prove di omogeneità su tutta l'area da rinforzare ed effettuando il rilievo strutturale del degrado del materiale, per esempio mediante reticoli metallici. Il periodo di osservazione non dovrebbe essere inferiore a sei mesi.

Le prove di caratterizzazione meccanica della muratura vanno previste in ragione di almeno 1 prova per 100 m² di area da rinforzare, con un minimo di 2 prove per ogni zona omogenea, secondo una almeno delle seguenti modalità:

- prova di compressione su campione di muratura;
- prova a taglio su campione di muratura;
- prova con martinetti piatti;
- prova di taglio con martinetto;
- prova dilatometrica per muratura a sacco;
- prove con ultrasuoni.

La rimozione delle parti di muratura deteriorata consente di verificare lo stato del materiale lapideo, naturale o artificiale, e della malta e quindi di programmare l'esecuzione di interventi che, prima di procedere alla ricostruzione delle parti murarie rimosse, consentono di eliminare ove possibile le cause del deterioramento della muratura stessa. Qualora sui materiali sia in

atto un processo di esfoliazione, di polverizzazione, di fessurazione o un attacco chimico-fisico, è necessario rimuovere lo strato deteriorato mediante spazzolatura o sabbiatura e poi trattare la superficie con idonei inibitori del processo in atto.

Una volta che il substrato deteriorato sia stato rimosso e siano stati adottati gli opportuni provvedimenti per bloccare i processi di degrado dei materiali, nonché tutti gli altri fenomeni che siano causa di esso (ad esempio infiltrazioni d'acqua o presenza di microvegetazione), si può procedere alla ricostruzione delle parti rimosse mediante l'utilizzo di prodotti compatibili con la muratura stessa.

Al ripristino delle parti di murature ammalorate è opportuno associare il livellamento di eventuali asperità superficiali superiori a 10 mm. Il livellamento può essere effettuato con stucco epossidico compatibile per asperità comprese tra i 10 mm ed i 20 mm; oppure con malta fibrorinforzata per asperità superiori ai 20 mm. Se l'elemento da rinforzare presenta fessure di ampiezza superiore a 0.5 mm, è opportuno che queste ultime siano richiuse mediante iniezione prima di applicare il rinforzo.

3.3.10 Raccomandazioni per l'esecuzione a regola d'arte

La qualità dell'esecuzione del rinforzo con materiali compositi dipende fortemente dalle condizioni di temperatura ed umidità ambientali, nonché da quelle del substrato su cui il rinforzo è applicato. Alle precauzioni di base, indipendenti dal

sistema di rinforzo, si aggiungono delle precauzioni specifiche per garantire la qualità di installazione di sistemi *in situ* la cui polimerizzazione avviene sul posto e quindi non è controllata in stabilimento.

Si sconsiglia di installare rinforzi di composito se l'ambiente è molto umido in quanto un elevato grado di umidità può ritardare la stagionatura delle resine nonché inficiare la perfetta realizzazione del composito nel caso di sistemi con polimerizzazione *in situ*.

È sconsigliato installare il rinforzo se le suddette temperature non ricadono nell'intervallo 10°-35° C. Parimenti, è sconsigliato installare il rinforzo nel caso in cui la superficie muraria sia esposta a forte soleggiamento.

Nel caso di applicazioni in ambiente esterno è sempre consigliabile proteggere il sistema di rinforzo dall'azione diretta dell'irraggiamento solare, che può produrre alterazioni chimico-fisiche nella matrice epossidica.

In alternativa, si può ottenere una protezione maggiore mediante l'applicazione sul composito già messo in opera di intonaci o malte (preferibilmente di natura cementizia). Tali intonaci, di spessori consigliati dai produttori e/o fornitori, vanno posati sul sistema di rinforzo, previa preparazione della superficie mediante applicazione di resina epossidica con successivo spolvero "fresco su fresco" di polvere di quarzo. Lo strato così realizzato è particolarmente idoneo a ricevere qualsiasi tipo di intonaco.

Ai fini della protezione al fuoco si possono adottare due differenti soluzioni: l'uso di pannelli intumescenti o l'applicazione di intonaci protettivi.

In entrambi i casi produttori e/o fornitori devono indicare il grado di protezione in relazione allo spessore del rivestimento.

Allo stato attuale sono reperibili sul mercato rivestimenti protettivi, di spessore e consistenza adeguati, in grado di contenere, in caso di incendio, la temperatura del composito al di sotto di 80°C per un tempo di 90 min.

3.3.11 Qualifica degli operatori

I profili professionali degli operatori preposti alle prove devono corrispondere ai seguenti tre livelli di qualifica appresso specificati (Tabella 5-2), in conformità con la normativa di riferimento UNI EN 473, UNI EN 45013.

La qualifica va anche regolata in accordo con la normativa UNI EN 45013-Criteri generali riguardanti gli Organismi di Certificazione preposti alla certificazione del personale.

Livello 1: Regolare l'apparecchiatura; eseguire le prove; registrare e classificare i risultati in relazione a criteri scritti; stendere un resoconto sui risultati.

Livello 2: Scegliere la modalità operativa della prova da utilizzare; definire i limiti di applicazione della prova per la quale la persona di livello 2 è qualificata; comprendere le norme e le specifiche di prova e tradurle in istruzioni pratiche di prova adattate alle condizioni reali di lavoro; regolare e tarare le

apparecchiature; effettuare e sorvegliare le prove; interpretare e valutare i risultati in funzione delle norme, dei codici o delle specifiche da rispettare; redigere le istruzioni scritte di prova per il livello 1; svolgere e sorvegliare tutti gli incarichi propri di un livello 1; addestrare o guidare il personale di livello inferiore al livello 2; organizzare i risultati di una prova e redigere il relativo rapporto.

Livello 3: Assumere l'intera responsabilità di un laboratorio di prova e del relativo personale; stabilire e convalidare le tecniche e le procedure di prova; interpretare le norme, i codici, le specifiche e le procedure; stabilire le prove specifiche, e le procedure che è opportuno utilizzare; avere la competenza per valutare ed interpretare i risultati in relazione alle norme, ai codici ed alle specifiche esistenti; avere una sufficiente conoscenza pratica dei materiali, della fabbricazione e della tecnologia dei vari prodotti interessati al fine di poter scegliere i metodi, stabilire le tecniche e collaborare alla definizione di criteri di accettazione quando non ne esistano di prestabiliti; avere una conoscenza nei diversi campi di applicazione; avere la capacità di guidare il personale di livello inferiore al livello 3.

3.3.12 Monitoraggio dell'intervento di rinforzo

La disponibilità relativamente modesta di dati relativi al comportamento a lungo termine dei materiali compositi consiglia, in situazioni di particolare rilevanza (con riferimento alla destinazione d'uso dell'edificio e/o del manufatto sul quale si

è intervenuti, al numero di elementi rinforzati e all'entità degli incrementi di resistenza conseguiti), un'adeguata attività di monitoraggio delle applicazioni mediante sensori incorporati o mediante l'esecuzione periodica di prove non distruttive e semi-distruttive.

Scopo del monitoraggio è tenere sotto controllo i seguenti parametri o alcuni di essi:

- temperatura del rinforzo;
- umidità ambientale;
- andamenti di spostamenti e deformazioni;
- continuità e livello del danneggiamento delle fibre;
- estensioni di difetti e distacchi dell'applicazione.

Caratteristiche dei materiali utilizzati

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è quello di studiare un composito a matrice cementizia con armatura diffusa in epoxy-carbon destinato al consolidamento di pareti murarie con dissesti in atto e, a scopo preventivo, al miglioramento delle proprietà meccaniche di murature integre.

Tale composito, realizzato in collaborazione con precedenti lavori di tesi, applicato per uno spessore di un centimetro su entrambe le facce di pannelli murari conformi alla norma ASTM E519-74, ha già dimostrato, nelle prove in compressione diagonale, la sua efficacia.

Con l'intervento di rivestimento infatti si è riuscito ad ottenere un cedimento di tipo monolitico della parete, con incrementi della resistenza a taglio e a compressione del 160% e del 200% rispetto ai valori della muratura non rinforzata.

Tali valori, essendo confrontabili con quelli conseguiti applicando la sola matrice cementizia, hanno suggerito una più accurata analisi micromeccanica mirata a valutare l'efficienza dei chiodi di armatura utilizzati, del tipo a 4 tows ($\phi=2\text{mm}$) e ad individuarne possibili miglioramenti intesi sia in termini di

incremento di proprietà meccaniche del composito, sia in termini di riduzione della quantità necessaria per unità di superficie, a parità di prestazioni.

A tal fine non è stata modificata la matrice cementizia, costituita da:

- Cemento alluminoso
- Lattice
- Fibre di carbonio HR

e sono stati realizzati chiodi di armatura in epoxy-carbon, costituiti da:

- fibre di carbonio HR
- resina epossidica
- sabbia fine ($<0,1\text{mm}$)

variandone la lunghezza e il diametro.

Con tali chiodi infine si sono realizzati compositi con diversa percentuale in volume.

4.1 I materiali costituenti la matrice

La matrice è una pasta cementizia fibrosa. La presenza delle fibre modifica profondamente il comportamento del cemento in fase di indurimento: in assenza di fibre infatti il ritiro che accompagna le reazioni di idratazione causa la formazione di profonde fessure che sgretolano il materiale.



Fig.4.1- Crepe da ritiro in cemento senza fibre

Aggiungendo fibre corte (*chopped*) all'impasto cementizio è possibile ridurre o annullare tale fenomeno. La quantità di fibre necessarie a compensare il ritiro del cemento dipende da:

- composizione chimica del cemento
- materiale e rapporto di aspetto delle fibre
- qualità dell'adesione fibra-matrice

Tale ultimo aspetto, in particolare, si è rivelato critico per i materiali scelti a causa delle scarse proprietà di adesione tra cemento alluminoso e fibre di carbonio e ha reso necessario il ricorso al lattice.

Con l'ausilio dei dati sperimentali ricavati da prove di caratterizzazione condotte su provini di matrice realizzati variando:

- lunghezza media delle fibre ($l_f < 0,5 \text{ cm}$; $l_f > 0,5 \text{ cm}$)
- percentuale di idratazione del lattice (tra 100% e 70%)

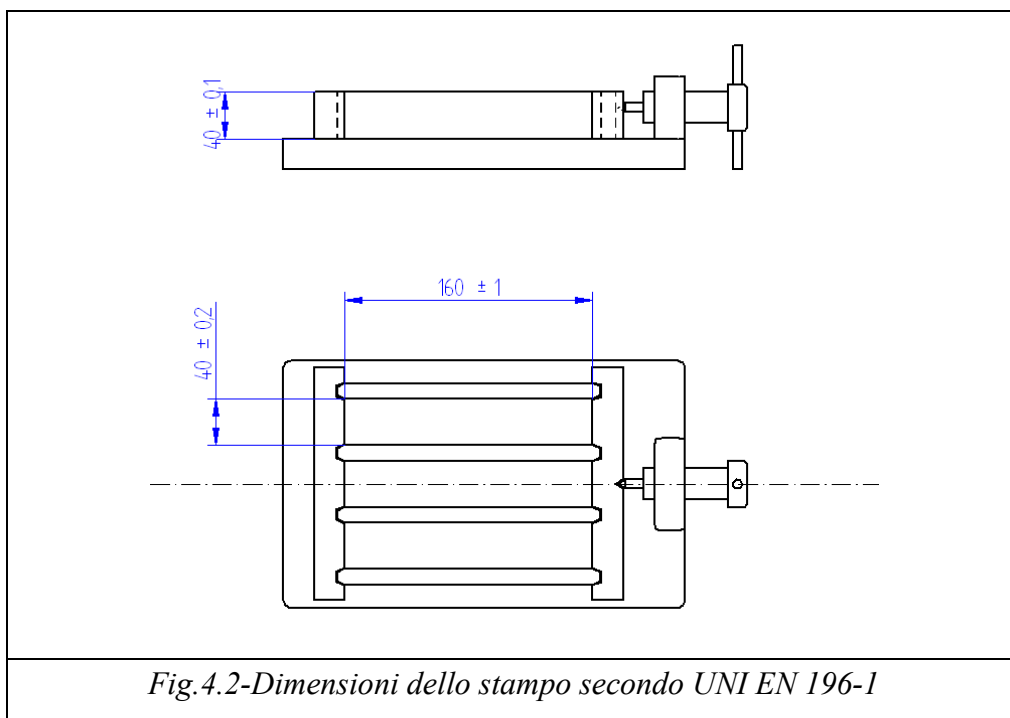
si è scelta la configurazione per la quale si sono riscontrate le migliori prestazioni meccaniche.

Le prove, svolta presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione dell'Università degli

studi di Napoli Federico II in conformità alla normativa UNI EN 196-1, hanno richiesto la realizzazione di provini prismatici aventi dimensione: 40 mm × 40 mm × 160 mm.

Tali provini sono stati realizzati mediante uno stampo, di cui si riportano le dimensioni e le tolleranze prescritte:

- lunghezza (160 ± 1) mm;
- larghezza ($40 \pm 0,2$) mm;
- profondità ($40 \pm 0,1$) mm;
- la tolleranza sulla complanarità delle facce interne (ISO 1101) deve essere non più grande di 0,03 mm;
- la tolleranza sulla perpendicolarità delle facce (ISO 1101) non deve essere più grande di 0,2 mm;
- la finitura delle superfici interne non deve essere maggiore di N8 (EN ISO 1302);

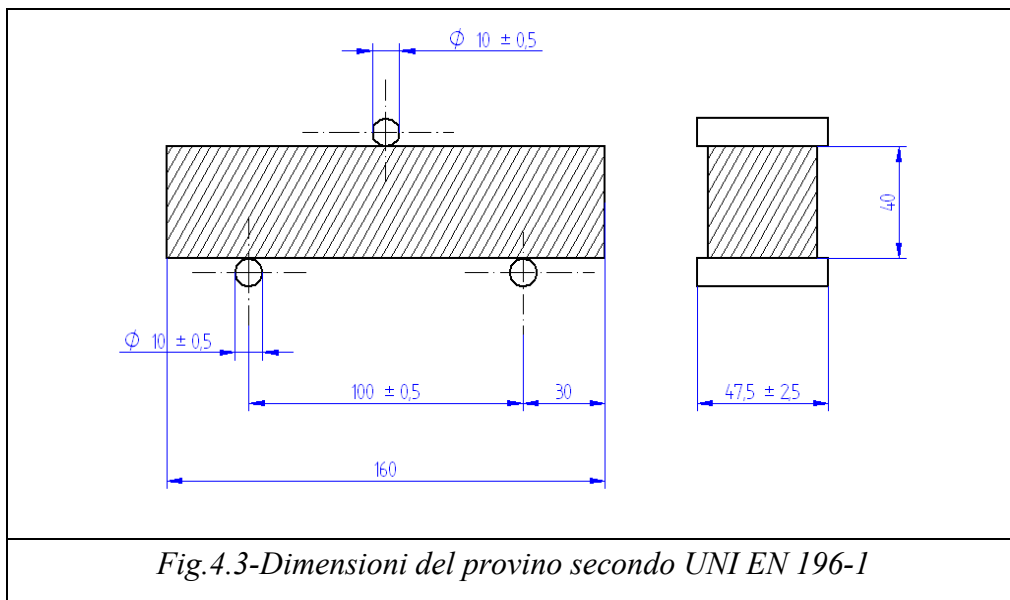


La stessa norma stabilisce inoltre le modalità di esecuzione della prova e la relazione tra i parametri sperimentali che definiscono la resistenza a flessione. Tale valore si ricava dalla media aritmetica di almeno tre valori di resistenza calcolati per uno stesso set di provini mediante la formula:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_t \times l}{b^3}$$

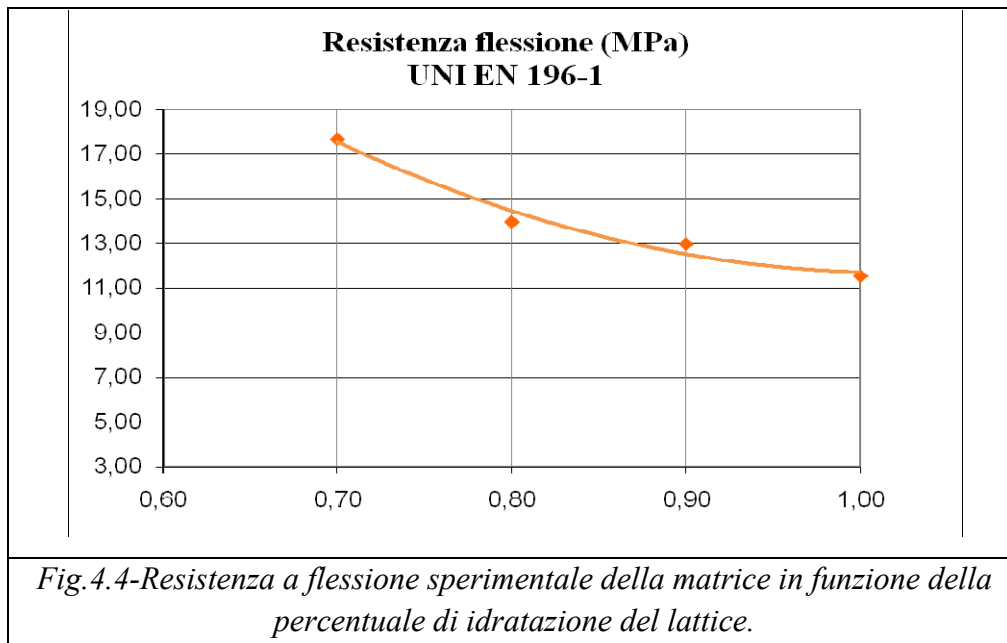
dove

- R_f è la resistenza a flessione in Megapascal;
- b è la lunghezza del lato in sezione del prisma in millimetri;
- F_t è il carico applicato nella mezzeria del provino;
- l è la distanza tra i due supporti in millimetri;



Le prove, eseguite dopo due settimane di stagionatura utilizzando la macchina MTS Alliance RT Material Test System da 50KN, hanno evidenziato la scarsa influenza sulla resistenza a

flessione della lunghezza delle fibre e un incremento delle prestazioni al decrescere delle percentuali di idratazione.



Disponendo di tali dati e considerando che, per valori di idratazione inferiori al 70% si verifica la formazione di uno strato gommoso sulla superficie della matrice, si sono fissate le proporzioni dei costituenti.

Tali valori, espressi rispetto al peso del cemento, sono:

- 28%-29% di lattice idrato al 70 %
- 1% di fibre di carbonio chopped con $l_m=0,5$

4.1.1 Cemento alluminoso

Il costituente principale della matrice è il cemento alluminoso.

Il cemento alluminoso HAC (High Alumina Cement) è un particolare tipo di legante idraulico con cui si ottiene un

calcestruzzo dalle caratteristiche eccellenti. Rispetto ad altri leganti idraulici esso presenta:

- maggiore resistenza a flessione ed a compressione;
- buona resistenza chimica;
- ottima resistenza al fuoco e alle alte temperature;
- granulometria più fine
- PH sostanzialmente neutro dell'impasto.

Non sono solo le migliori proprietà meccaniche che lo rendono preferibile ad altri tipi di cemento: la granulometria più fine e il pH neutro infatti sono caratteristiche egualmente importanti quando si prevede di utilizzarlo con un rinforzo fibroso di carbonio.

Per apprezzare le differenti prestazioni meccaniche del cemento alluminoso si riportano nelle tabelle 5.1 e 5.2, per confronto, anche i valori della resistenza a flessione e a compressione del cemento Portland:

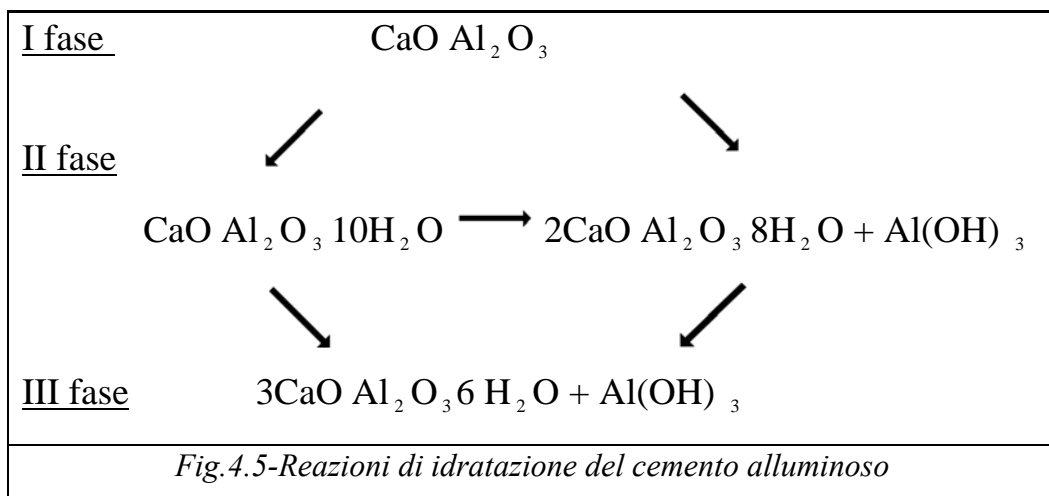
Cemento Portland					Cemento alluminoso			
1	3	7	28	giorni	1	3	7	28
-	-	40	60	$\frac{Kgf}{cm^2}$	40	60	-	80
<i>Tabella 4.1-Resistenze a flessione</i>								
Cemento Portland					Cemento alluminoso			
1	3	7	28	giorni	1	3	7	28
-	-	175	325	$\frac{Kgf}{cm^2}$	175	325	-	525
<i>Tabella 4.2-Resistenze a compressione</i>								

La composizione chimica è inoltre responsabile del suo comportamento neutro e della sua buona resistenza al fuoco.

Il clinker di HAC è composto da:

- 60-70% $\text{CaO Al}_2\text{O}_3$
- 10-15% 2CaO SiO_2
- $4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{ Fe}_2\text{O}_3$
- < 6% $2\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{ SiO}_2$

La presenza nel cemento alluminoso di Al(OH)_3 , sostanza anfotera, provoca la sostanziale neutralizzazione del Ca(OH)_2 , e come risultato quindi un cemento praticamente inerte.



La terza fase, che avviene al di sopra dei 30-35°C, è nota con il nome di conversione delle paste di cemento alluminoso; questa non è desiderata in quanto avviene quando il materiale è già parzialmente indurito, ed essendo accompagnata da una diminuzione di volume, porta alla comparsa di porosità e microfratture.

La presenza in forte quantità di allumina caratterizza l'elevata resistenza al fuoco di tale cemento: a 700°C infatti, la rottura dei legami idraulici viene accompagnata dalla formazione di legami ceramici. Tali legami, pur essendo più fragili, tuttavia consentono di raddoppiare la resistenza al fuoco della struttura.

Si riportano, infine, i valori comparati dei tempi di presa

Cemento Portland		Cemento alluminoso	
inizio	termine	inizio	termine
≥ 45 min.	≤ 12 h.	≥ 30 min.	≤ 10 h.
<i>Tabella 4.3-Tempi di presa</i>			

4.1.2 Lattice di gomma sintetica per impasti cementizi

Il lattice utilizzato, prodotto da Mapei col nome commerciale “*Planicrete*”, è una dispersione acquosa costituita al 40% da uno speciale elastomero sintetico, totalmente resistente alla saponificazione alcalina.

Tale lattice, non nocivo secondo la norma CEE 88/379, ha un peso specifico di 1,02g/cm³ e un comportamento basico, con pH pari a 10.

Secondo quanto riportato dalla scheda tecnica del prodotto, gli impasti modificati con lattice, con differenti percentuali di

idratazione, oltre a migliorarne la lavorabilità, dopo presa ed indurimento finale mostrano:

- migliore aderenza a tutte le superfici;
- migliore resistenza alla flessione ed all'abrasione;
- maggiore impermeabilità e resistenza ai cicli gelo-disgelo;
- migliore flessibilità;
- migliore resistenza chimica agli acidi ed alcali diluiti, alle soluzioni saline ed agli oli.

4.1.3 Fibre di carbonio

Le fibre corte aggiunte all'impasto cementizio sono state ottenute tagliando frammenti della lunghezza media di 5mm da tows in fibra di carbonio ad alta resistenza con titolo 200tex/3k.

Il valore 3k nel titolo della fibra di carbonio indica che essa è costituita da circa 3000 filamenti primari apprettati; essendo il

diametro medio del tow di 0,3mm, ogni fibretta che lo costituisce ha un diametro di circa $0,1\ \mu\text{m}$.

Quando tali fibre vengono disperse nella matrice, l'appretto si scioglie liberando una grande quantità di fili primari.



Fig.4.6-Fibre corte di carbonio

4.2 Preparazione e proprietà meccaniche della matrice

La preparazione della matrice richiede, dopo aver preventivamente pesato con una bilancia di precisione la giusta

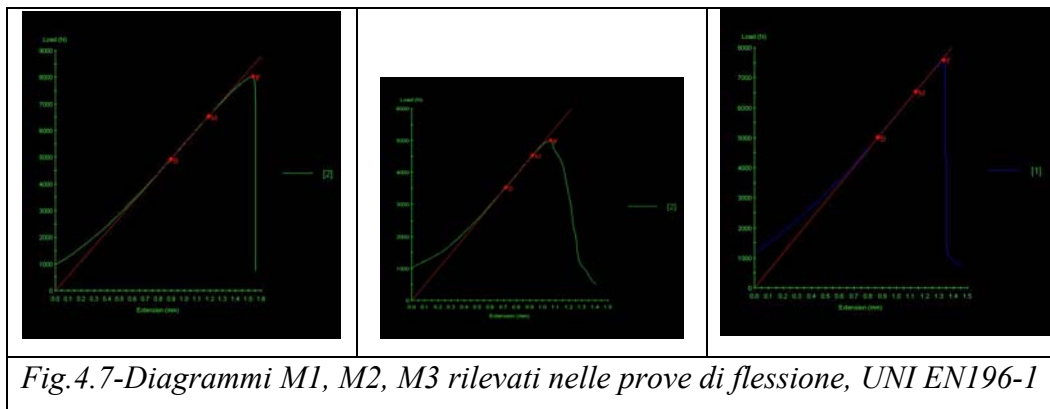
quantità di fibre sciolte, una fase di impasto a secco dei due componenti.

Tale esigenza deriva dalla necessità di avere una omogenea diffusione delle fibre nella matrice, per assicurarne un comportamento macroscopicamente isotropo, e dal pericolo di formazione di grumi nell'impasto quando ad esso è aggiunto il lattice. Le proprietà adesive di quest'ultimo infatti creerebbero dei grovigli di fibre e lattice in cui non sarebbe più possibile la miscelazione con il cemento dando luogo, nel prodotto finito, a inclusioni con bassa resistenza meccanica.

Nella preparazione del composito per la realizzazione dei provini si è fatto precedere all'aggiunta del lattice idrato anche la dispersione a secco dei chiodi di armatura.

L'aggiunta, infine, del lattice alla miscela così preparata deve essere seguita da una rapida posa in opera del materiale per i suoi ridotti tempi di presa, che lo rendono difficilmente lavorabile già dopo circa 20'.

Dai diagrammi rilevati nelle prove di flessione UNI EN 196-1 su provini costituiti dalla matrice cementizia con la composizione scelta, si è osservato un andamento quasi elastico lineare fino a rottura.



Si è quindi calcolato, per ogni prova, il modulo di Young, sul tratto lineare, utilizzando la relazione:

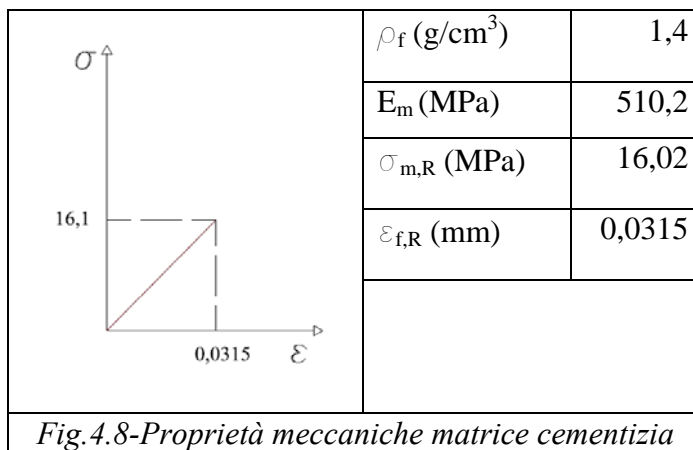
$$E = \frac{\Delta F}{\Delta v} \frac{l^3}{4bh^3}$$

	ΔF (N)	Δv (mm)	σ^* (Mpa)	Fmax(N)	E (MPa)
M1	3000,00	0,53	17,58	7500,00	552,77
M2	1900,00	0,40	11,72	5000,00	463,87
M3	3000,00	0,57	18,75	8000,00	513,98

I valori medi ottenuti sulle tre prove sono stati quindi:

$$E = 510,2MPa$$

$$\sigma_{Rf} = 16,02MPa$$



4.3 I materiali costituenti i chiodi di armatura

I requisiti necessari affinché i chiodi di armatura svolgano un efficace azione di rinforzo nel composito a matrice cementizia sono:

- elevato modulo di Young;
- elevata resistenza;
- elevate proprietà di adesione con la matrice.

Il modulo di Young e la resistenza del composito infatti dipendono dagli omologhi valori del rinforzo, fortemente ridotti dai coefficienti di efficienza della lunghezza, η_L e di orientamento, η_O .

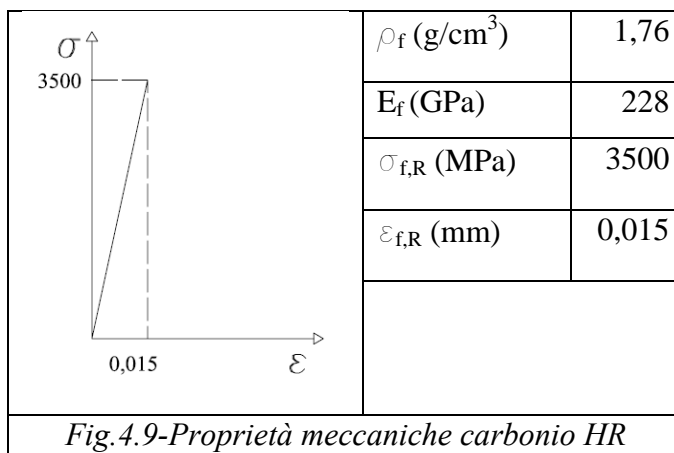
Le proprietà di adesione, inoltre, determinano la lunghezza critica dei chiodi, al di sotto della quale il materiale non è utilizzato pienamente.

Le ottime proprietà meccaniche dei compositi in carbonio e resina epossidica non si sono quindi rivelate, da sole, sufficienti a soddisfare le richieste per un loro utilizzo come rinforzo, mancando completamente l'adesione con la matrice cementizia.

Il miglioramento dell'aderenza che si è conseguito realizzando su di essi uno strato di interfaccia ad elevata rugosità, mediante l'utilizzo di una sabbia fine, ha infine permesso la scelta di tali materiali per la realizzazione dei chiodi.

4.3.1 Fibre di carbonio

Per la realizzazione dei chiodi in epoxy-carbon sono stati utilizzati tows in fibra di carbonio ad alta resistenza con titolo 200tex.



Ai valori riportati in tabella delle proprietà meccaniche occorre aggiungere, per caratterizzarne la geometria, il diametro medio. Noto il titolo e la densità, tale grandezza è stata calcolata utilizzando la definizione di tex:

$$\pi \frac{d_f^2}{4} 10^5 \cdot 1,76 = 200 \Rightarrow d_f = \sqrt{\frac{200 \cdot 4}{1,76 \pi 10^5}} = 0,038 \text{ cm}$$

4.3.2 Resina epossidica

Per la realizzazione dei chiodi di armatura è stata utilizzata una matrice plastica termoindurente di tipo epossidico.

La resina epossidica è stata preferita a quella poliestere e vinilestere perché, oltre a presentare proprietà meccaniche superiori rispetto a tali alternative, è caratterizzata anche da una migliore resistenza all'umidità ed agli agenti chimici.

Proprietà	Epossidica	Poliestere	Fenolica	Poliammidica
ρ (g/cm ³)	1,1-1,4	1,1-1,5	1,3	1,2-1,9
E (GPa)	2,1-6,0	1,3-4,5	4,4	3-3,1
σ_R (Mpa)	35-90	45-85	50-60	80-190
α	55-110	100-200	45-110	14-90
T _{max} (°C)	150	50	150	280
<i>Tabella 4.4-Proprietà delle matrici termoindurenti</i>				

In particolare per la sua bassa viscosità, che lo rende idoneo all'impregnazione a mano, e per la sua particolare formulazione, che ne consente la polimerizzazione a temperatura ambiente, è stato utilizzato il sistema epossidico bi componente Becor SX10.

Tale sistema è costituito da due componenti:

- resina epossidica;
- indurente.

La resina epossidica non è considerata sostanza nociva; gli indurenti epossidici invece, sono catalogati come sostanze irritanti: possono causare irritazioni agli occhi e alle mucose, e

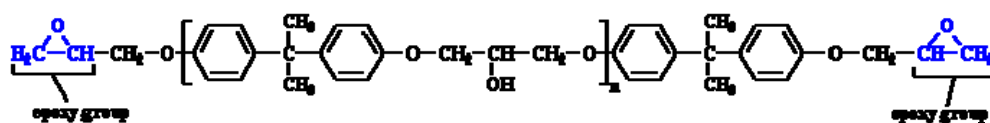
specialmente, dermatiti con la possibilità di sensibilizzazione, quindi vanno manipolati con le dovute precauzioni

Contrariamente alle resine poliestere e vinilestere, in cui il secondo componente è un catalizzatore che accelera i processi di reticolazione dei polimeri, nei sistemi epossidici l'indurente è un reagente. Miscelando i componenti si ha cioè una reazione che dà luogo a nuovi complessi molecolari a catena lunga.

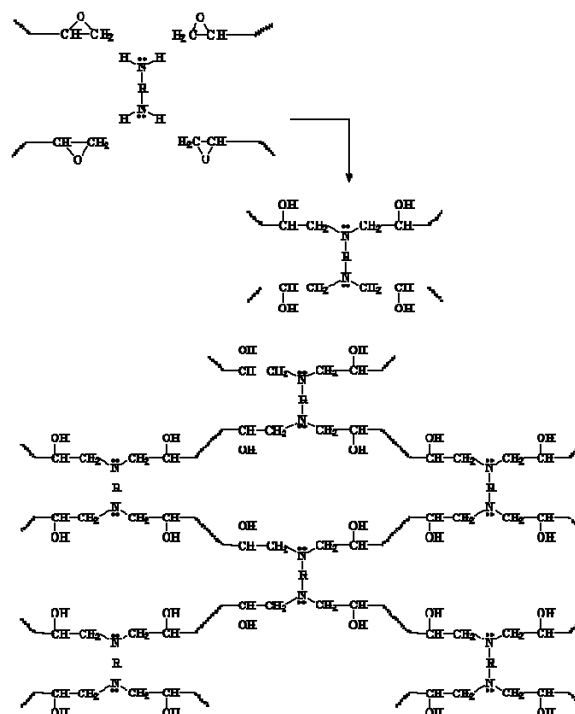
Per ogni tipo di impiego esistono specifici sistemi epossidici caratterizzati da differenti *pot life*, legati al diverso potere reattivo dell'indurente utilizzato, e da differenti proprietà meccaniche, legate ai diversi prodotti di reazione.

E' tuttavia sempre necessario il perfetto rispetto delle dosi di impiego per assicurare una corretta polimerizzazione.

Nel sistema Becor SX10, il componente principale è un polimero a basso peso molecolare con gruppi epossidici ad ogni estremità mentre l'indurente è una diammina.



La loro combinazione, in rapporto ponderale di 100:26, dà luogo alla formazione di un polimero con struttura reticolare con un pot life di circa 30 minuti.



4.4 Preparazione e proprietà meccaniche dei chiodi di armatura

I chiodi di armatura sono stati realizzati mediante impregnazione a mano dei tows di carbonio e successivo rivestimento di sabbia fine.

Con lo scopo di ottenere un composito ad elevate caratteristiche meccaniche, quale potrebbe essere ottenuto con un processo di pultrusione, si è cercato di riprodurre un ciclo artigianale ad esso confrontabile:

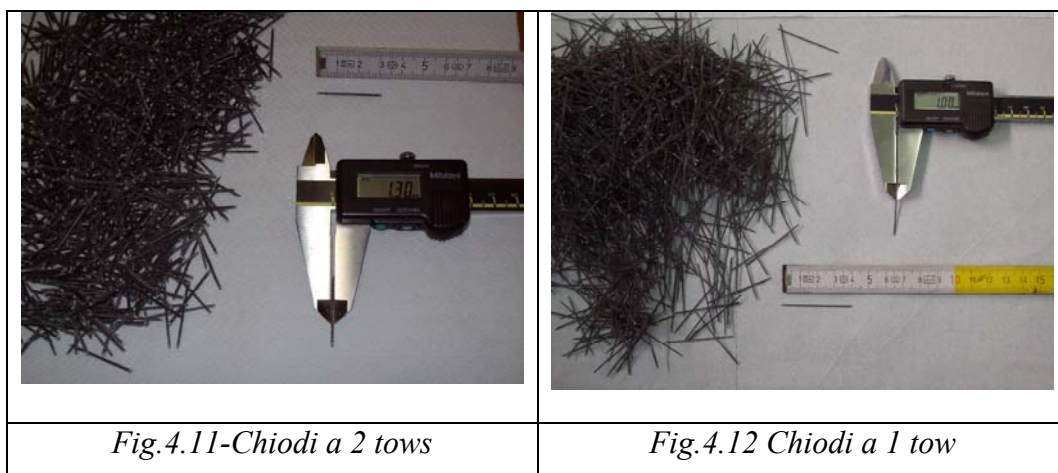
1. preparazione dei fascetti in fibra di carbonio della lunghezza di 120cm uniti alle estremità con nastro adesivo;
2. impregnazione a mano dei tows;
3. torsione delle fibre ca. 10/m;

4. disposizione in trazione su appositi telai predisposti mediante elementi elastici distanziati di 60cm;
5. rimozione dell'eccesso di resina;
6. rivestimento di sabbia mediante immersione nella direzione delle fibre.



Le fibre così trattate, dopo un tempo di polimerizzazione di 1-2 giorni, sono state rimosse dai telai e tagliate alla lunghezza richieste per la realizzazione dei diversi provini.

Il processo è governato dalle caratteristiche della resina: oltre al perfetto rispetto dei dosaggi dei due componenti del sistema epossidico Becor SX10 infatti, il pot life di 30'-40' limita i tempi di ogni fase successiva.



Le proprietà meccaniche delle chiodi di armatura possono essere determinate analiticamente attraverso la legge delle miscele. Per applicare tale equazione è necessario calcolare la percentuale volumetrica di fibre nel composito ottenuto.

I valori medi dei diametri rilevati sui chiodi ad un tow e a due tows rivestiti di sabbia sono stati rispettivamente:

$$D'_{CH1} = 0,9mm$$

$$D'_{CH2} = 1,5mm$$

Da tali misure, considerando lo spessore del rivestimento invariato e pari a 0,15mm, si sono dedotti i diametri dei chiodi senza rivestimento:

$$D_{CH1} = 0,6mm$$

$$D_{CH2} = 1,2mm$$

e da essi, attraverso la definizione di percentuale volumetrica,

$$\phi_f = \frac{\pi d^2 L}{4} \frac{4}{\pi D^2 L} = \left(\frac{d}{D} \right)^2$$

i valori ottenuti nell'impregnazione:

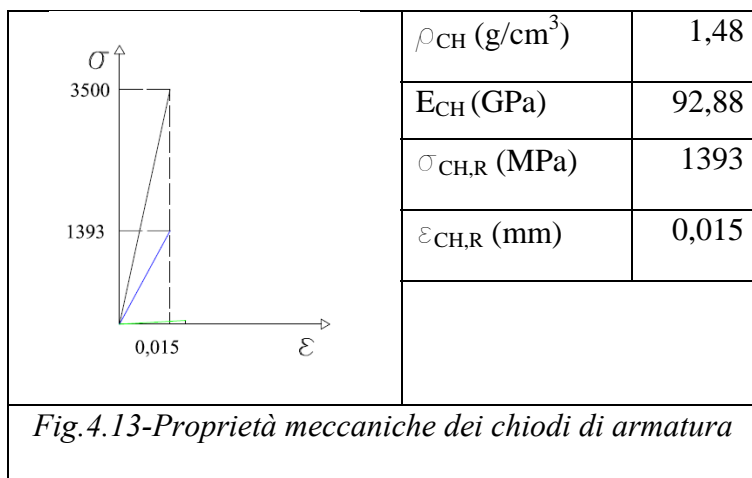
$$\phi_{f,1} = \left(\frac{0,38}{0,6} \right)^2 = 0,40$$

$$\phi_{f,2} = \left(\frac{2 \cdot 0,38}{1,2} \right)^2 = 0,40$$

Infine, applicando la regola delle miscele:

$$E_{CH} = 0,4 \cdot 228 + 0,6 \cdot 2,8 = 92,88 GPa$$

$$\sigma_{CH,R} = E_{CH} \cdot \varepsilon_{f,R} = 1393 MPa$$



Capitolo 5

Caratterizzazione del cemento

5.1 Premessa

La prima fase dello studio della malta cementizia, svolta presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione dell'Università degli studi di Napoli Federico II, ha riguardato delle prove volte all'individuazione delle migliori percentuali di cemento e lattice per la miscelazione degli stessi, alla valutazione sia del comportamento della miscela che alla sua interazione con la fibra di carbonio. Ottenute queste informazioni siamo passati direttamente alla caratterizzazione dei provini a flessione secondo le normative vigenti.

5.2 Descrizione della prova: Norma UNI EN 196-1

Le prime prove sperimentali di caratterizzazione del cemento utilizzato sono state realizzate facendo riferimento alla normativa UNI EN 196-1 del Luglio 2005.

Questa norma descrive il metodo per la determinazione delle resistenze a compressione ed a flessione delle malte di cemento, e quindi della loro caratterizzazione.

Quindi andremo a determinare la resistenza a flessione di provini di cemento prismatici aventi dimensione :

40 mm × 40 mm × 160 mm come prescrive la norma.

Questa norma non descrive solo come realizzare i provini, ma fornisce anche le indicazioni sulle condizioni ambientali del laboratorio nel quale debbono essere effettuate le prove.

In base alla suddetta norma, il laboratorio in cui vengono preparati i provini deve essere mantenuto ad una temperatura di $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e l'umidità relativa non deve essere minore del 50%.

Per quanto concerne i provini, questi devono essere realizzati mediante uno stampo, lo stesso deve essere costruito in maniera tale da poter realizzare almeno tre provini contemporaneamente, in quanto tale è il numero minimo necessario per la caratterizzazione di un certo tipo di cemento.

Lo stampo, inoltre, deve essere realizzato in maniera tale da facilitare la rimozione dei provini senza danneggiarli.

Le dimensioni e le tolleranze di ogni compartimento devono essere le seguenti:

- lunghezza (160 ± 1) mm;
- larghezza $(40 \pm 0,2)$ mm;
- profondità $(40 \pm 0,1)$ mm;
- la tolleranza sulla complanarità delle facce interne (ISO 1101) deve essere non più grande di 0,03 mm;
- la tolleranza sulla perpendicolarità delle facce (ISO 1101) non deve essere più grande di 0,2 mm;
- la finitura delle superfici interne non deve essere maggiore di N8 (EN ISO 1302);

La norma inoltre suggerisce di utilizzare un materiale sigillante per chiudere lo stampo ed evitare così di far fuoriuscire un eventuale liquido in eccesso.

Si riporta sotto, in figura, lo schema con le misure principali e le tolleranze dimensionali da adottare.

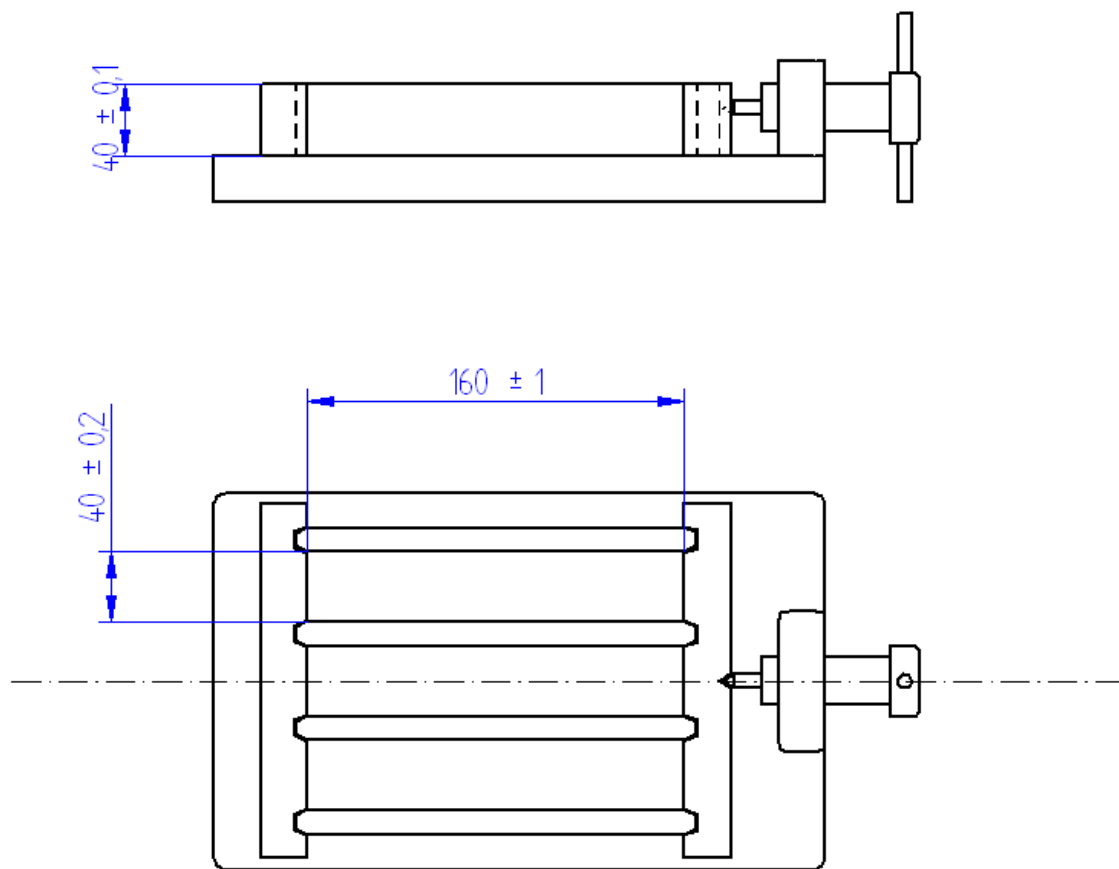


Fig. 5.1 Misure e tolleranze dimensionali dello stampo in mm

La macchina per la determinazione della resistenza flessionale deve essere capace di applicare un carico superiore ai 10 kN con una velocità di applicazione del carico di (50 ± 10) N/s.

Sotto, in figura, viene mostrato l'apparato utilizzato per realizzare le prove; si tratta della macchina MTS Alliance RT Material Test System da 50KN.

Si riporta anche lo schema presente sulla norma con le rispettive misure:

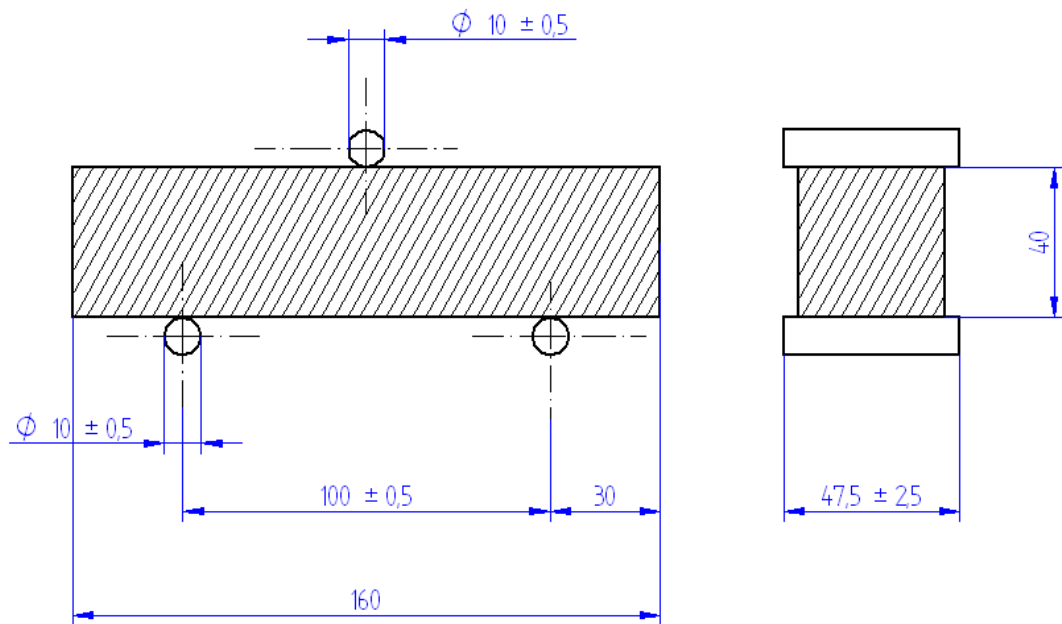


Fig. 5.2 Schema e misure della prova a flessione in mm



Fig. 5.3 Esecuzione della prova

La norma stabilisce anche come calcolare la resistenza a flessione:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_t \times l}{b^3}$$

dove

- R_f è la resistenza a flessione in Megapascal;
- b è la lunghezza del lato in sezione del prisma in millimetri;
- F_t è il carico applicato nella mezzera del provino;
- l è la distanza tra i due supporti in millimetri;

Il risultato, nel momento in cui si vuole caratterizzare un tipo di cemento, deve essere calcolato come media aritmetica di un numero minimo di tre prove, realizzate con prismi appartenenti allo stesso set.

Riportiamo di seguito l'elenco delle prove realizzate con i rispettivi diagrammi forniti dalla macchina MTS Alliance RT.

5.3 Prove di flessione

Analizzeremo prima le prove realizzate utilizzando cemento alluminoso ed acqua, per compararne il comportamento con i provini realizzati utilizzando il lattice.

5.3.1 Prima fase di prove

Prove F1

- Composizione: cemento alluminoso ed acqua (nelle proporzioni 3,3 : 1);
- Lattice: non presente nell'impasto;

I provini appaiono, dopo la stagionatura, già segnati da profonde crepe da ritiro.

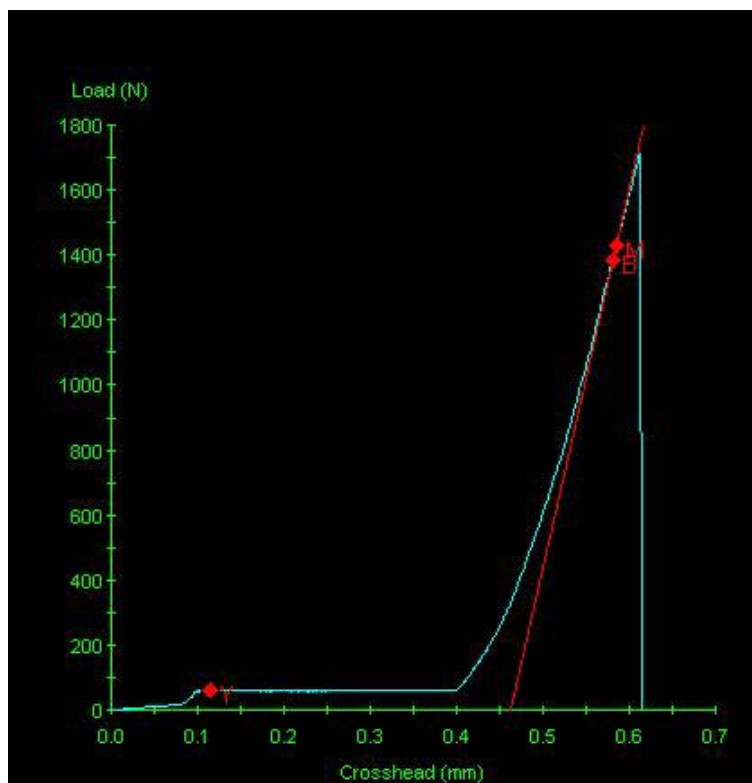


diagramma prova F1

La tensione di rottura minima è stata di 3,4MPa, mentre la massima è stata di 4,00MPa. E' stato riportato il diagramma del provino che ha presentato tensione di rottura massima. Dall'esame del diagramma si nota come, dopo una prima fase nella quale il carico vince la resistenza dello strato più esterno del provino, c'è una impennata, indice della elevata rigidità del materiale. Il carico di rottura raggiunto dal provino è di 1707N.

Dopo questo punto c'è la rottura di schianto del provino, che mostra anche la elevata fragilità del materiale.

Tale comportamento, abbastanza scadente, del provino in esame potrebbe essere dovuto al fatto che esso sia costituito da solo cemento ed acqua, presentando quindi una scarsa resistenza a trazione che non gli consente elevate deformazioni. Quindi il passo successivo sarà quello di studiare il comportamento dello stesso cemento miscelato però con il lattice, idrato ad una percentuale di partenza da noi scelta, riducendo cioè la quantità di acqua nel componente liquido della malta.

Si nota infatti come anche la freccia al momento della rottura sia bassa: siamo su valori prossimi ai 0,25 mm.

Prove F2

- Composizione: cemento alluminoso e lattice (nelle proporzioni 2,9 : 1);
- Lattice: presente nell'impasto ed idrato al 70%;

Subito dopo l'asciugatura si notano delle profonde crepe sul materiale ed uno strato di lattice in superficie.

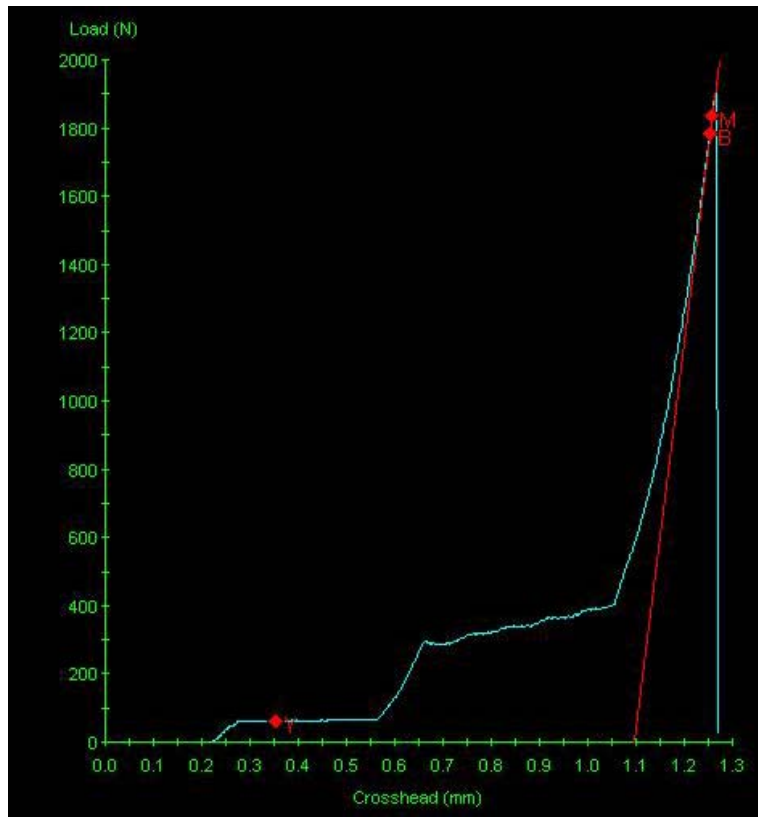


diagramma prova F2

La tensione di rottura minima e massima dei provini è stata rispettivamente di 4,30MPa e di 4,70MPa. E' stato riportato il diagramma del provino che ha presentato tensione di rottura massima. Dal comportamento del materiale si nota come questo non sia rinforzato in alcun modo. Si tratta infatti soltanto di cemento alluminoso miscelato con il lattice idrato.

Dall'analisi del diagramma si evince come, dopo una prima fase in cui viene vinta la resistenza dello strato più superficiale, il provino arrivi subito a rottura.

Il tipo di rottura è indicativo della composizione del materiale, trattandosi di una rottura di schianto.

Dopo la rottura del provino si nota uno strato di materiale sulla superficie dello stesso, non perfettamente solidificato, che interessa il provino per gran parte dello spessore, fino ad 1 cm dalla superficie. Si tratta di gran parte del lattice che, essendo salito in superficie, non riesce a solidificare per il suo modulo elastico e resta in uno stato che possiamo definire gommoso.

Questo fenomeno potrebbe essere causato da un eccesso di lattice oppure dal fatto che le superfici dello stampo siano impermeabili rendendo quindi più accentuato questo fenomeno.

Questo strato gommoso è sicuramente deleterio in quanto perdiamo gran parte della sezione resistente, quasi un quarto.

Dobbiamo però pensare che in una eventuale applicazione di questo materiale come rinforzo, non ci spingeremmo mai a realizzare un tale spessore e probabilmente non avremmo delle superfici impermeabili come per lo stampo. Tale risultato, però, ci spinge ovviamente ad uno studio più dettagliato della percentuale di lattice più idonea, nel componente liquido della malta.

5.3.2 Analisi dei risultati della prima fase e premessa della seconda

Analizzando i provini realizzati in questa prima fase si rileva sempre la presenza di crepe, queste interessando gran parte dello spessore del materiale, diminuiscono la resistenza a flessione.

Quindi per cercare di eliminare o almeno di ridurre questo fenomeno abbiamo pensato di introdurre all'interno del cemento delle fibre di carbonio disperse (fig.5.4), aventi diversa lunghezza. Le fibre sono state aggiunte nella quantità di 1g di fibre corte ogni 100g di cemento. Le fibre devono presentare una distribuzione omogenea all'interno dell'impasto. Il raggiungimento di tale condizione può essere ostacolato dalla formazione di accumuli di fibre, comunemente chiamati “ciuffi” o “grumi”. Per cercare di ovviare a questo ultimo problema abbiamo messo le fibre corte all'interno del cemento ancora in polvere (fig.5.5), e dopo averle disperse, abbiamo aggiunto il lattice.



Fig. 5.4 Fibre corte



Fig. 5.5 Fibre corte disperse nel cemento

5.3.3 Seconda fase di prove

In questa seconda fase abbiamo voluto indagare sul comportamento della malta cementizia per diverse lunghezze delle fibre corte e per diverse percentuali di idratazione del lattice.

Prove F3

- Composizione: cemento alluminoso ed acqua (nelle proporzioni 3,3 : 1);
- Lattice: non presente nell'impasto;
- Sono state disperse fibre corte nell'impasto nell'1% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 3-4 mm;

Sia appena realizzati i provini che dopo la stagionatura, di circa 2 settimane, non si notano crepe sulla superficie dei provini.

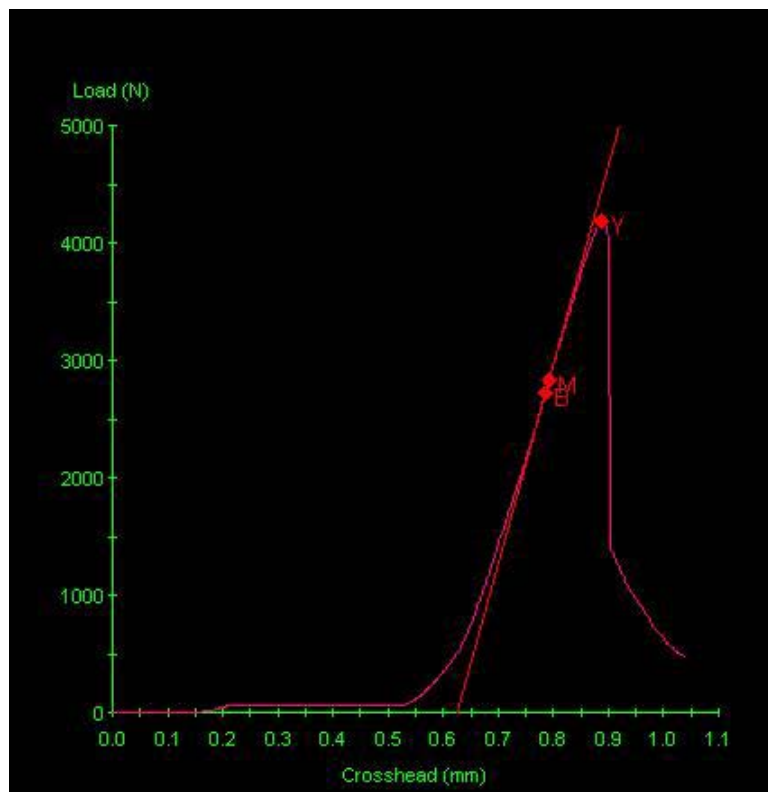


diagramma prova F3

La tensione di rottura minima è stata di 9,30MPa, mentre quella massima è stata di 13,31MPa. E' stato riportato il diagramma del provino che ha presentato tensione di rottura massima.

Si nota, come rispetto allo stesso provino senza fibre disciolte, il carico di rottura sia aumentato in maniera notevole; c'è infatti un incremento medio di poco più del 300% della σ_f di rottura.

La freccia nel momento della rottura risulta però quasi invariata; siamo infatti arrivati a 0,3 mm.

L'aggiunta di fibre disperse in una matrice cementizia ne modifica le proprietà meccaniche. In particolare, migliora il comportamento a trazione contrastando l'apertura progressiva delle fessure.

Una volta raggiunta la fessurazione della matrice, le fibre sono in grado di manifestare il proprio contributo, conferendo al composito una resistenza post- fessurazione assente nella matrice senza fibre.

Per piccole percentuali volumetriche di fibre (circa 0,2-2%) il legame carico- spostamento a trazione presenta un ramo discendente (comportamento degradante), ma è caratterizzato da una resistenza residua e da una maggiore tenacità. Per percentuali volumetriche di fibre superiori (circa 2-8%), il comportamento può diventare incrudente, grazie alla comparsa di una multifessurazione.

La percentuale volumetrica di fibre disperse nel nostro caso è superiore al 3%, e quindi ci troviamo nel caso incrudente.

L'aggiunta di fibre inoltre può migliorare la tenacità, la durabilità, nonché la resistenza all'urto (resilienza), alla fatica ed all'abrasione della matrice cementizia.

La presenza delle fibre, con questi dosaggi, riduce però la lavorabilità dell'impasto, soprattutto nel caso di forme complesse.

Anche in questo secondo caso si è verificata la rottura di schianto del provino.

Prove F4

- Composizione: cemento alluminoso e lattice (nelle proporzioni 2,9 : 1);
- Lattice: presente nell'impasto ed idrato al 90%;
- Sono state disperse fibre corte nell'impasto nell'1% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 3-4 mm;

Sia appena realizzati i provini che dopo la stagionatura, di circa 2 settimane, non si notano crepe né lattice sulla superficie dei provini.

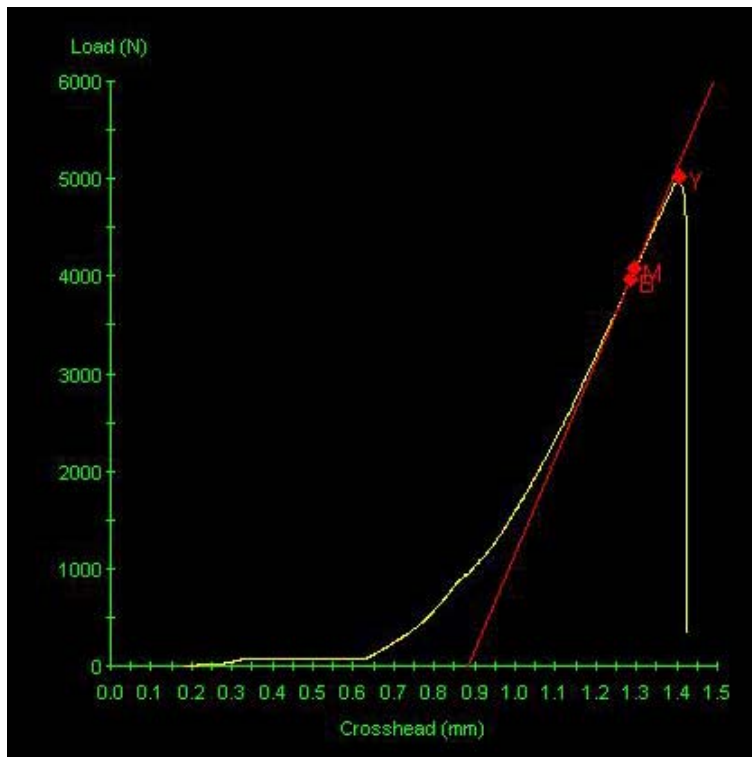


diagramma prova F4

La tensione di rottura minima è stata di 11,60MPa, mentre quella massima è stata di 14,40MPa. E' stato riportato il diagramma del provino che ha presentato tensione di rottura massima.

Si nota come per questo tipo di provini la σ_f di rottura è in media leggermente superiore a provini F3. Vogliamo però verificare se ci sono altri cambiamenti, soprattutto nel comportamento del materiale.

Il valore della freccia che registriamo in questo caso è di 0,6mm. Questo è indice del diverso valore del modulo elastico, in questo caso sicuramente minore. Era prevedibile un comportamento di questo tipo in quanto abbiamo aumentato, all'interno della composizione, la percentuale del componente avente un modulo

elastico molto minore, il lattice, passando appunto da 100% acqua a 90% acqua e 10% lattice.

Questo composto risulta quindi meno rigido.

Prove F5

- Composizione: cemento alluminoso e lattice (nelle proporzioni 2,9 : 1);
- Lattice: presente nell'impasto ed idrato all'80%;
- Sono state disperse fibre corte nell'impasto nell'1% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 3-4 mm;

Sia appena realizzati i provini che dopo la stagionatura, di circa 2 settimane, non si notano crepe né lattice sulla superficie dei provini.

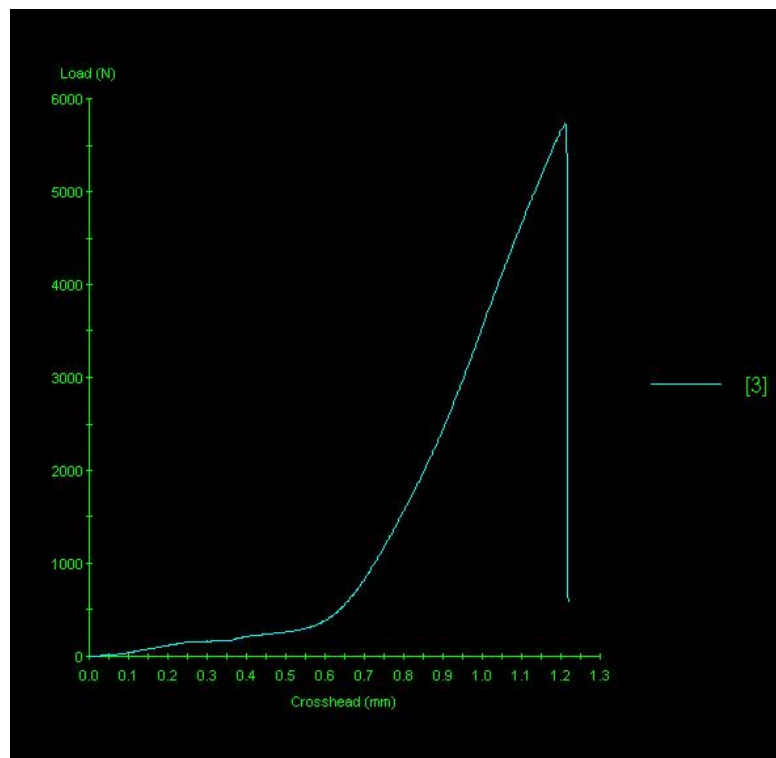


diagramma prova F5

La tensione di rottura minima è stata di 13,50MPa, mentre quella massima è stata di 14,60MPa. E' stato riportato il diagramma del provino che ha presentato tensione di rottura massima.

Si nota come per questo tipo di provini la σ_f di rottura è in media leggermente superiore ai provini F4. Vogliamo però verificare se ci sono altri cambiamenti, soprattutto nel comportamento del materiale.

Il valore della freccia che registriamo in questo caso è maggiore di 0,6mm. Questo è indice di un valore del modulo elastico, ancora più piccolo del caso precedente. Ovviamente anche questo aspetto era prevedibile per la stessa motivazione di prima visto che abbiamo ulteriormente aumentato, all'interno della composizione, la percentuale del lattice. Questo composto risulta quindi ancora meno rigido dell'ultimo esaminato.

Prove F6

- Composizione: cemento alluminoso e lattice (nelle proporzioni 2,9 : 1);
- Lattice: presente nell'impasto ed idrato al 70%;
- Sono state disperse fibre corte nell'impasto nell'1% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 3-4 mm;

Sia appena realizzati i provini che dopo la stagionatura, di circa 2 settimane, non si notano crepe sulla superficie dei provini, bensì un leggero strato di lattice.

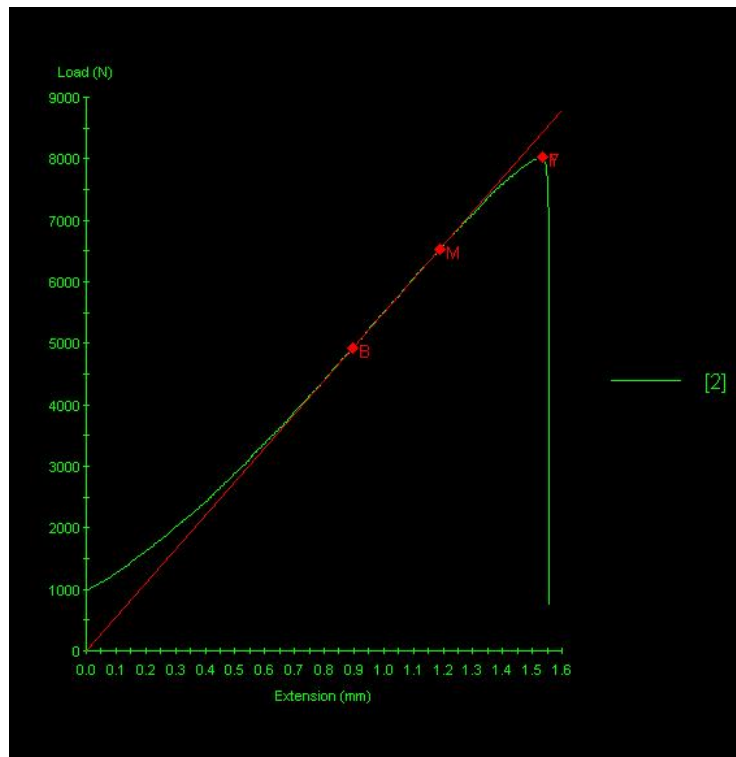


diagramma prova F6

La tensione di rottura minima è stata di 16,40MPa, mentre la massima è stata di 18,75MPa. E' stato riportato il diagramma del provino che ha presentato tensione di rottura massima.

Si nota come per questo tipo di provini la σ_f di rottura è in media leggermente superiore a provini F5. Dall'analisi di questo diagramma si nota subito l'elevato valore della freccia, che risulta quasi triplicata rispetto al più alto dei valori riscontrati precedentemente. Si legge infatti dal diagramma un valore superiore a 1,6 mm.

Questo comportamento indica che il materiale possiede un modulo elastico minore rispetto ai composti delle precedenti esperienze ed è quindi più facilmente deformabile.

Dopo la rottura notiamo la caduta quasi verticale del carico applicato e quindi una rottura quasi di schianto. La presenza di fibre corte di carbonio infatti migliora il comportamento del materiale fino all'apertura della cricca, ma non dopo.

In questo caso si riscontra come lo strato superficiale del provino non sia perfettamente indurito; questo fenomeno è sicuramente provocato da un eccesso di lattice ed interessa il provino per circa 1/8 del suo spessore.

Successivamente sono stati eseguiti dei provini dello stesso tipo dei precedenti (da F3 a F6) con la sola variazione della lunghezza delle fibre. Riassumeremo velocemente tali prove in quanto non hanno portato significative variazioni di valori sia di σ_f di rottura che di freccia massima e quindi di valore del modulo elastico.

Prove F7

- Composizione: cemento alluminoso ed acqua (nelle proporzioni 3,3 : 1);
- Lattice: non presente nell'impasto;
- Sono state disperse fibre corte nell'impasto nell'1% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 7-8 mm;

Sia appena realizzati i provini che dopo la stagionatura, di circa 2 settimane, non si notano crepe sulla superficie dei provini.

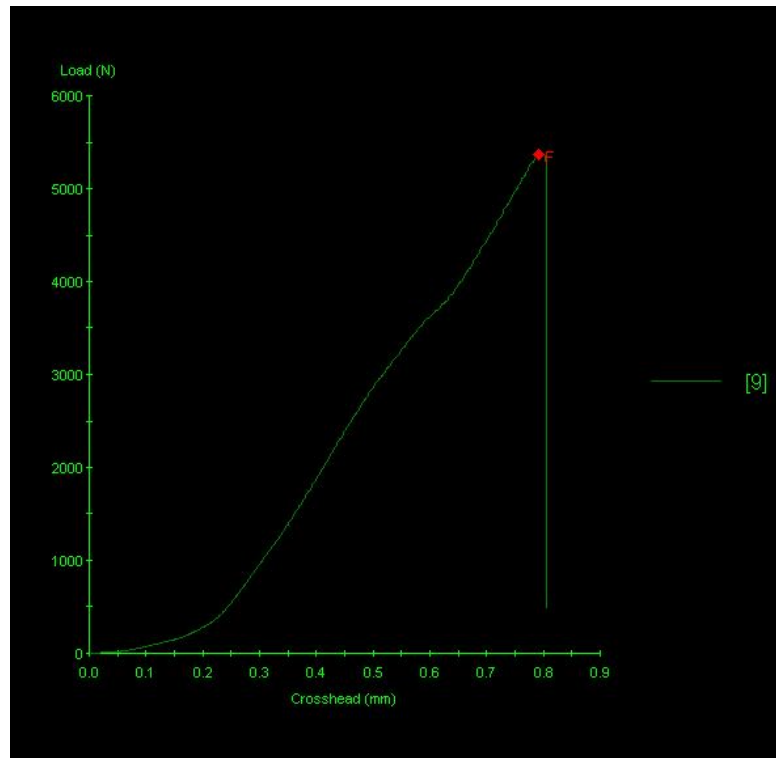


diagramma prova F7

La tensione di rottura minima è stata di 12,30MPa, mentre la massima è stata di 12,70MPa. E' stato riportato il diagramma del provino che ha presentato tensione di rottura massima.

Notiamo come questi provini presentano un comportamento simile a quelli dello stesso tipo (provini F3) avendo come unica differenza una lunghezza superiore delle fibre corte disciolte nel cemento.

Prove F8

- Composizione: cemento alluminoso e lattice (nelle proporzioni 2,9 : 1);
- Lattice: presente nell'impasto ed idrato al 90%;
- Sono state disperse fibre corte nell'impasto nell'1% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 7-8 mm;

Sia appena realizzati i provini che dopo la stagionatura, di circa 2 settimane, non si notano crepe né lattice sulla superficie dei provini.

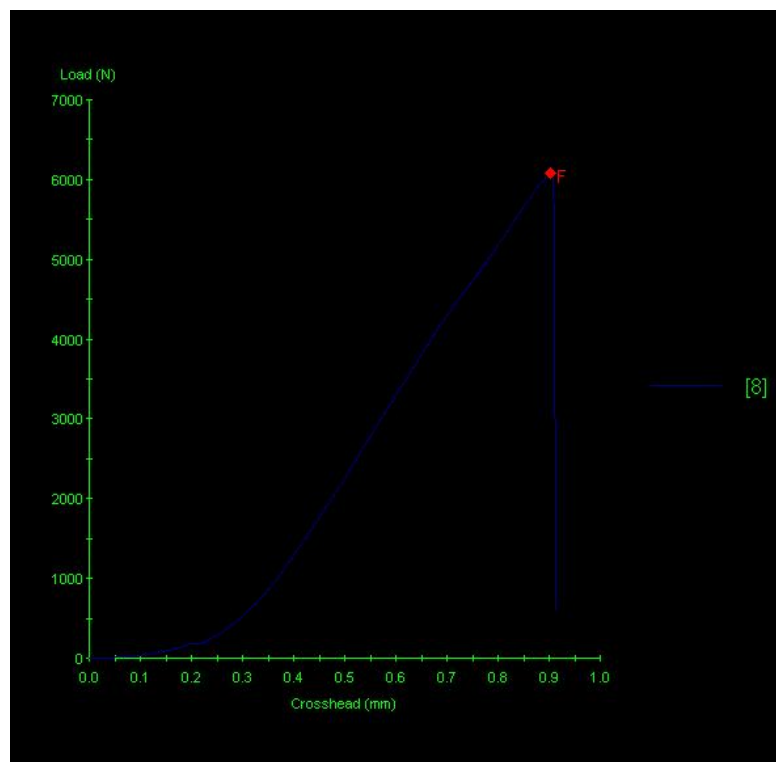


diagramma prova F8

La tensione di rottura minima è stata di 11,30MPa, mentre la massima è stata di 14,90MPa. E' stato riportato il diagramma del provino che ha presentato tensione di rottura massima.

Comportamento simile ai provini F4.

Prove F9

- Composizione: cemento alluminoso e lattice (nelle proporzioni 2,9 : 1);
- Lattice: presente nell'impasto ed idrato all'80%;
- Sono state disperse fibre corte nell'impasto nell'1% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 7-8 mm;

Sia appena realizzati i provini che dopo la stagionatura, di circa 2 settimane, non si notano crepe né lattice sulla superficie dei provini.

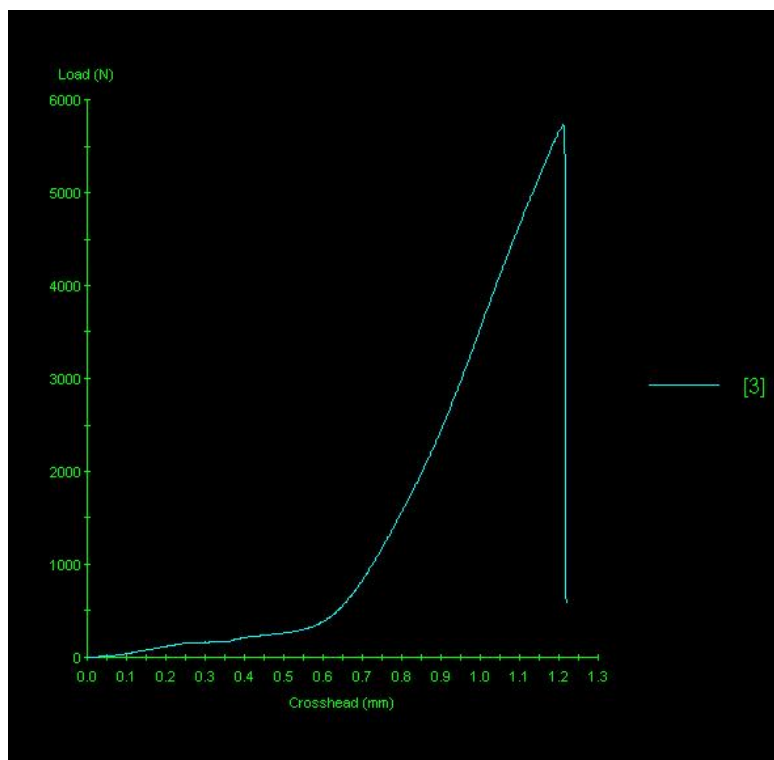


diagramma prova F9

La tensione di rottura minima è stata di 13,60MPa, mentre la massima è stata di 15,60MPa. E' stato riportato il diagramma del provino che ha presentato tensione di rottura massima.

Comportamento simile ai provini F5.

Prove F10

- Composizione: cemento alluminoso e lattice (nelle proporzioni 2,9 : 1);
- Lattice: presente nell'impasto ed idrato al 70%;
- Sono state disperse fibre corte nell'impasto nell'1% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 7-8 mm;

Sia appena realizzati i provini che dopo la stagionatura, di circa 2 settimane, non si notano crepe sulla superficie dei provini, bensì un leggero strato di lattice.

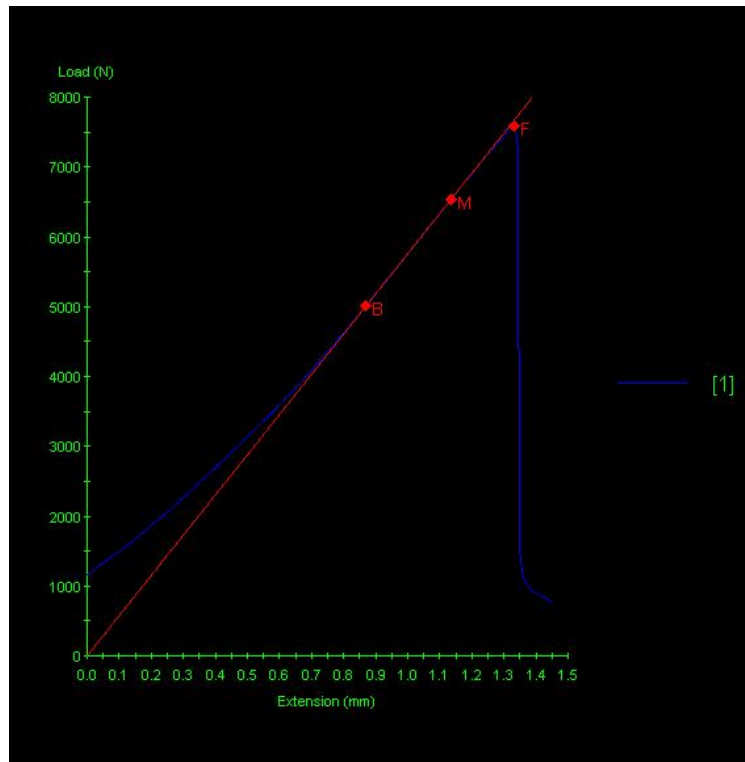


diagramma prova F10

La tensione di rottura minima è stata di 16,30MPa, mentre la massima è stata di 17,90MPa. E' stato riportato il diagramma del provino che ha presentato tensione di rottura massima.

Comportamento simile ai provini F6.

5.4 Analisi dei risultati

Nella seconda fase di sperimentazione si è potuto constatare l'efficienza delle fibre corte disciolte nel cemento. La loro presenza evita che si formino crepe da ritiro , riduce notevolmente il fenomeno della risalita del lattice in superficie e nello stesso tempo incrementa di molto la resistenza a flessione della malta. L'unico aspetto negativo, apportato dalle fibre, è l'aumento della densità e pastosità della malta la quale ovviamente risulta essere leggermente meno lavorabile. Nello stesso tempo bisogna fare attenzione a che le fibre siano perfettamente disciolte nel cemento in modo da poter aver un composto omogeneo, sia per ottenere un comportamento uniforme nei confronti della resistenza meccanica, sia per evitare il formarsi di grumi ; in quanto la loro presenza, seppure limitata, può provocare occlusioni tali da rendere difficoltose le operazioni di pompaggio nella messa in opera.

Riportando, nella tabella in basso, i risultati scaturiti dalle prove di caratterizzazione del cemento :

Composizione	Lattice	Fibre corte	Sforzo (MPa)
Cemento alluminoso ed acqua 3,3:1	Assente	Assenti	3,825
Cemento alluminoso e lattice 2,9:1	Idrato al 70%	Assenti	4,46
Cemento alluminoso ed acqua 3,3:1	Assente	1%*	11,55

Cemento alluminoso ed acqua 3,3:1	Assente	1% **	12,615
Cemento alluminoso e lattice 2,9:1	Idrato al 90%	1% *	12,99
Cemento alluminoso e lattice 2,9:1	Idrato al 90%	1% **	13,22
Cemento alluminoso e lattice 2,9:1	Idrato all' 80%	1% *	13,98
Cemento alluminoso e lattice 2,9:1	Idrato all' 80%	1% **	14,55
Cemento alluminoso e lattice 2,9:1	Idrato al 70%	1% *	17,695
Cemento alluminoso e lattice 2,9:1	Idrato al 70%	1% **	16,925

* fibre corte di 3-4mm

** fibre corte di 7-8mm

Note: è indicato il valor medio delle prove (in MPa).

Si può notare come la diversa lunghezza delle fibre corte, passando cioè dai provini con fibre corte di 3-4mm a quelli con fibre corte di 7-8mm, è ininfluyente nei confronti del comportamento della malta. Inoltre si è potuto vedere come la malta presenta resistenza a flessione crescente e modulo elastico decrescente all'aumentare della percentuale di lattice nel componente liquido (passando da 100% acqua a 70% acqua e 30% lattice).

Quindi, in conclusione, si può affermare che:

- la presenza delle fibre corte disperse all'interno dell'impasto evita sia che si formino delle crepe da ritiro, sia che il lattice risalga quasi tutto in superficie e nello stesso tempo aumenta la resistenza a flessione.
- la lunghezza delle fibre corte è influente sempre che sia al di sotto di un centimetro.
- la percentuale di idratazione di lattice che conferisce alla malta maggiore resistenza a flessione è quella del 70%, con l'unico inconveniente di presentare sulla superficie del provino un leggero strato di lattice (strato gommoso evidentemente causato dalle pareti impermeabili dello stampo che inducono alla risalita in superficie di una quantità di lattice).

Questi risultati, ottenuti seguendo la normativa, sono di grande interesse però nello stesso tempo presentano alcuni inconvenienti, tipo la risalita del lattice in superficie, che nella pratica applicazione evidentemente non si verificherebbero. Dobbiamo perciò verificarne il comportamento con una prova che simuli le reali condizioni di esercizio di tutto il rinforzo.

Infatti potrà essere solo questo tipo di prova a fornirci delle altre importanti informazioni per continuare il lavoro di ricerca.

Per questo siamo passati a prove di adesione, trazione e flessione della malta cementizia applicata su un supporto di interesse edilizio (mattoni pieni) che esamineremo nel capitolo successivo.

Applicazioni della malta su supporto

6.1 Introduzione

La prima parte della sperimentazione, svolta presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione dell'Università degli studi di Napoli Federico II, ha riguardato dei provini di dimensione normalizzata, testati a flessione secondo la normativa UNI EN 196-1.

In seguito agli ottimi risultati ottenuti, abbiamo effettuato una serie di prove non regolate da normative che ci hanno permesso di verificare la bontà dei risultati avuti nella prima fase.

Siamo così passati ad una applicazione della malta studiata su un supporto in muratura. Tale supporto consiste nel mattone pieno classificato come UNI 5628-65, avente dimensione 5,5 cm x 12 cm x 25 cm (fig.6.1).

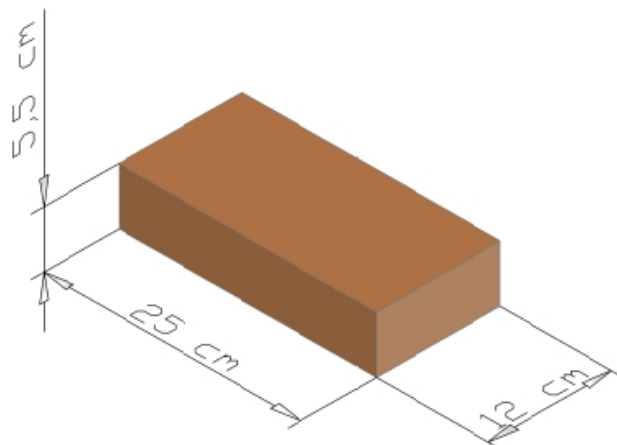


Fig. 6.1 Mattone pieno

Durante la prima fase, quindi, abbiamo studiato le caratteristiche meccaniche della malta fin a se stesse, cioè le caratteristiche intrinseche; ora vedremo il suo comportamento in relazione al tipo di supporto utilizzato.

6.2 Descrizione della prova di adesione

In questa prova abbiamo verificato il comportamento della malta sul mattone e la sua tendenza ad aderire o meno su di esso. L'adesione della malta sul supporto, infatti, è un aspetto di fondamentale importanza, in quanto la mancata adesione comporterebbe la delaminazione della malta (slittamento relativo della stessa rispetto al supporto) e di conseguenza la inefficienza totale del suo utilizzo. Per effettuare tale prova di adesione abbiamo costruito un attrezzo ad hoc, prendendo spunto da documentazioni bibliografiche, di dimensioni tali da poter sostenere gli eventuali carichi in gioco (fig.6.2).



Fig. 6.2 Attrezzo per la prova di adesione

In particolare abbiamo tagliato un mattone pieno in due metà (fig. 6.3) in modo tale da alleggerire il peso di tutto il sistema; su entrambe le facce dei due mezzi mattoni pieni e su entrambi i lati è stata applicata una striscia di malta della lunghezza di 10 cm per parte, larghezza 10 cm ed avente spessore di 1 cm ca.(fig. 6.4). Abbiamo poi isolato la parte centrale, compresa tra i due elementi in laterizio, dal contatto con la malta stessa mediante un striscia di pellicola plastica per evitare che la malta aderisse sull'attrezzo ed inficiasse il risultato della prova.



Fig. 6.3 Mezzi mattoni pieni

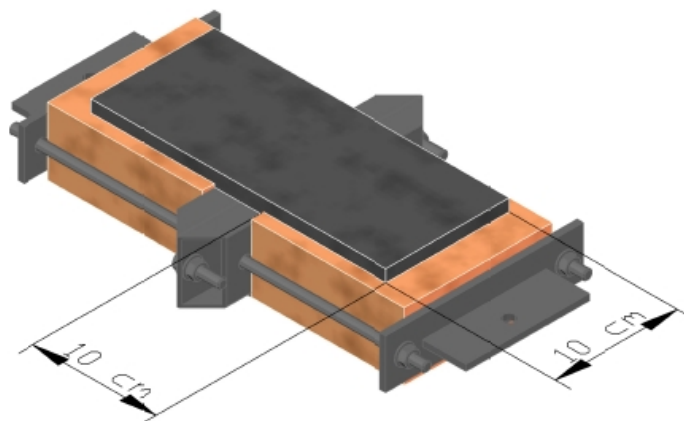


Fig. 6.4 Schema e misure dell'attrezzo montato e pronto per la prova

Per l'esecuzione di tale prova è stata adoperata una macchina elettromeccanica universale capace di applicare un carico superiore ai 10 KN con una velocità di applicazione del carico di (50 ± 10) N/s. Le prove sono state eseguite in controllo di spostamento, con velocità di spostamento pari a 0,9 mm/min. e mediante apposito software, è stato possibile seguire la curva carico- spostamento durante ogni prova. Al termine della prova è stato registrato il carico di trazione massimo e la modalità di rottura del provino.

Riportiamo di seguito (fig.6.5) l'apparato utilizzato per realizzare le prove e la modalità di carico; si tratta della macchina MTS Alliance RT Material Test System da 50 KN, la stessa utilizzata per le prove di caratterizzazione.



Fig. 6.5 Esecuzione della prova

6.2.1 Prove di adesione

Prove A1

- Composizione: cemento alluminoso e lattice (nelle proporzioni 2,9 : 1);
- Lattice: presente nell'impasto ed idrato al 70%;
- Non sono state disperse fibre corte nell'impasto;

Subito dopo l'asciugatura si notano delle profonde crepe sul materiale (fig. 6.6), che fanno subito intuire la scarsissima resistenza a trazione. Successivamente, in fase di test, la malta ha collassato per il solo peso della struttura, evidenziandosi che la stessa, senza fibre disciolte all'interno, presenta resistenza a trazione pressochè nulla.



Fig. 6.6 Malta segnata da evidenti e profonde crepe

Prove A2

- Composizione: cemento alluminoso e lattice (nelle proporzioni 2,9 : 1);
- Lattice: presente nell'impasto ed idrato al 70%;
- Sono state disperse fibre corte nell'impasto nell'1% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 5 mm;

Non si notano crepe né lattice sulla superficie dei provini, sia appena realizzati che dopo la stagionatura di circa 2 settimane.

La malta ha presentato un'ottima adesione al supporto, non si è avuta delaminazione della stessa, bensì si è avuta rottura della malta per trazione ad un carico massimo di 8166 N ed uno minimo di 8050N. Quindi considerando l'area della sezione resistente offerta dalla malta (100mm x 10mm x 2), la tensione di rottura a trazione massima è stata di 4,08 MPa, mentre la minima

è stata di 4,02 MPa. Di seguito è stato riportato il diagramma del provino che ha presentato tensione di rottura massima. Si può notare la rottura di schianto del composito, che mostra l'elevata fragilità tipica dei materiali compositi.

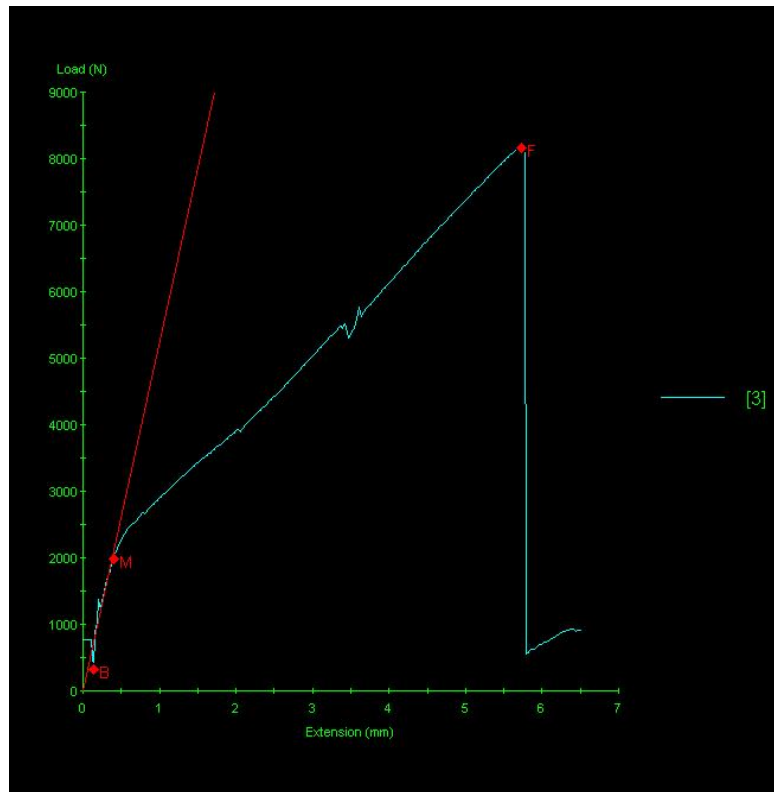


diagramma prova A2

6.2.2 Analisi dei risultati

Si è visto come la malta, in assenza di fibre corte disciolte, presenta una scarsissima resistenza anche sul supporto. Questa è stata una conferma del risultato che già si era avuto nella fase di caratterizzazione del cemento. Nel caso, invece, di malta con presenza di fibre, l'adesione è stata ottima e si è avuto il risultato

che si auspicava, potendosi così valutare la tensione di rottura a trazione della malta studiata. Ottenuto questo risultato incoraggiante siamo passati a valutare la resistenza a flessione sullo stesso tipo di supporto.

6.3 Descrizione della prova di flessione su due mattoni

In questo tipo di prova, abbiamo testato la resistenza a flessione della malta, applicata su un supporto (mattone pieno). In particolare abbiamo attestato due mattoni utilizzando, come malta cementizia, un cemento semplice (premiscelato a base di cemento) (fig.6.7) e poi abbiamo applicato, sulla superficie offerta dai due mattoni (51cm x 12cm), la malta studiata. Inizialmente abbiamo applicato la malta per uno spessore di 2 cm, si sono però verificati dei problemi per l'adesione, infatti la malta ha delaminato (fig.6.8).



Fig. 6.7 Mattoni pieni attestati uniti con cemento semplice



Fig. 6.8 Malta distaccata dal mattone

La delaminazione è stata causata dalla presenza di intense tensioni di ritiro nella malta, inconveniente non verificatosi nel corso delle prove di adesione. In quel caso la superficie offerta al rinforzo era nettamente più piccola che in quest'ultimo, ed inoltre lo spessore era inferiore. Per risolvere, allora, questo inconveniente, abbiamo pensato di applicare la malta per uno spessore più esiguo, ossia di 1cm (fig. 6.9a,b).



Fig. 6.9 a) Malta applicata sui due mattoni (foto di profilo)



Fig. 6.9 b) Malta applicata sui due mattoni (foto laterale)

Abbiamo curato, inoltre, l'aspetto dell'imprimitura, al quale non abbiamo provveduto nelle prove di adesione visto che non era sorto tale problema. Dalle due precedenti foto (fig 6.9 a e b) si possono anche notare i segni delle colature dell'imprimitura. L'imprimitura è la preparazione del supporto e consiste nel primo strato di materia che viene applicato al fondo prima di passare alla applicazione della malta, esso deve essere sufficientemente grezzo perché vi possa aderire lo strato successivo. Tale preparazione ha per l'adesione un'importanza tale che lo strato di imprimitura viene denominato “strato di aderenza”. Abbiamo effettuato l'imprimitura con un composto di cemento e lattice, nelle proporzioni 50 e 50 e quindi molto liquido. In seguito con una spugna abbiamo impregnato la superficie del mattone, fatto ciò abbiamo applicato la malta senza aspettare che l'imprimitura si asciugasse, ovvero abbiamo realizzato un'imprimitura “fresco

su fresco”. Si può, nelle foto riportate di seguito, vedere la differenza tra la superficie del supporto prima e dopo l'imprimatura (fig. 6.12).

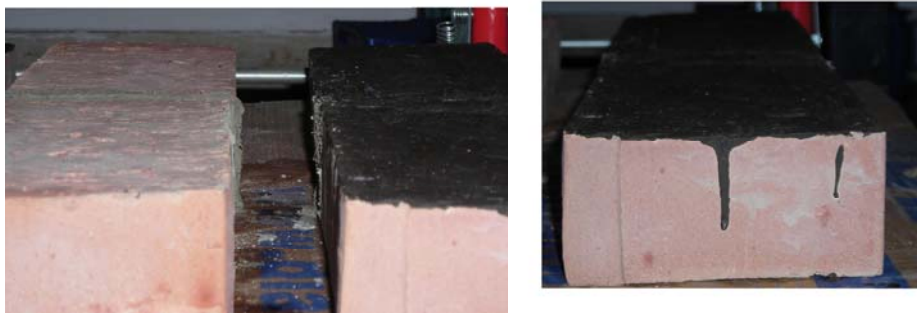


Fig. 6.12 Imprimatura

Risolto l'inconveniente della delaminazione della malta attraverso questi due espedienti, abbiamo fatto stagionare il provino per circa 2 settimane e quindi lo abbiamo testato (fig. 6.10).

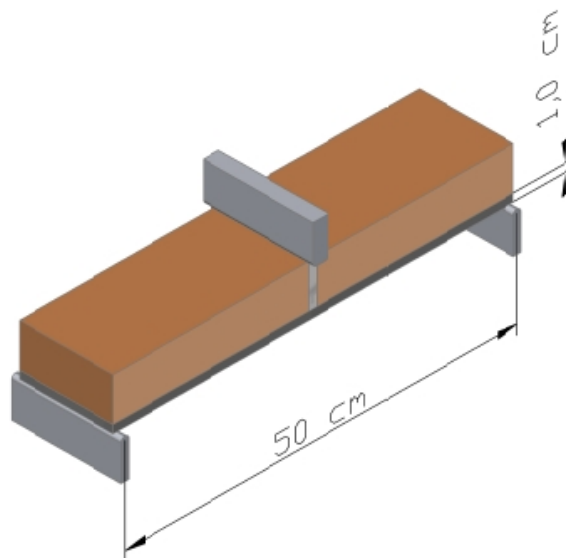


Fig. 6.10 Schema della prova

Riportiamo di seguito (fig.6.11) l'apparato utilizzato per realizzare le prove e la modalità di carico; si tratta della macchina MTS Alliance RT Material Test System da 500 KN.



Fig. 6.11 Esecuzione della prova

6.3.1 Prima fase di prove

Prove A

- Composizione: cemento alluminoso ed acqua (nelle proporzioni 3,3 : 1);
- Lattice: non presente nell'impasto;
- Sono state disperse fibre corte nell'impasto nell'1% in peso del cemento ed aventi lunghezza medi di 5 mm;

Impastata la malta ed applicandola sui mattoni si è presentata subito terrosa non lasciando nemmeno il tempo necessario per applicarla completamente; ciò significa che la presenza del mattone rende inutilizzabile il tipo di composto. Infatti ricordiamo che nello studio di caratterizzazione, questo tipo di composto presentava una sua resistenza a flessione che si è completamente vanificata una volta entrata in contatto con il mattone (fig.6.13).



Fig. 6.13 Esito negativo delle prove A

Prove B

- Composizione: cemento alluminoso e lattice (nelle proporzioni 2,9 : 1);
- Lattice: presente nel composto ed idrato all'80%;
- Sono state disperse fibre corte nell'impasto nell'1% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 5 mm;

Sia appena realizzati i provini che dopo la stagionatura, di circa 2 settimane, non si notano crepe né lattice sulla superficie degli stessi.

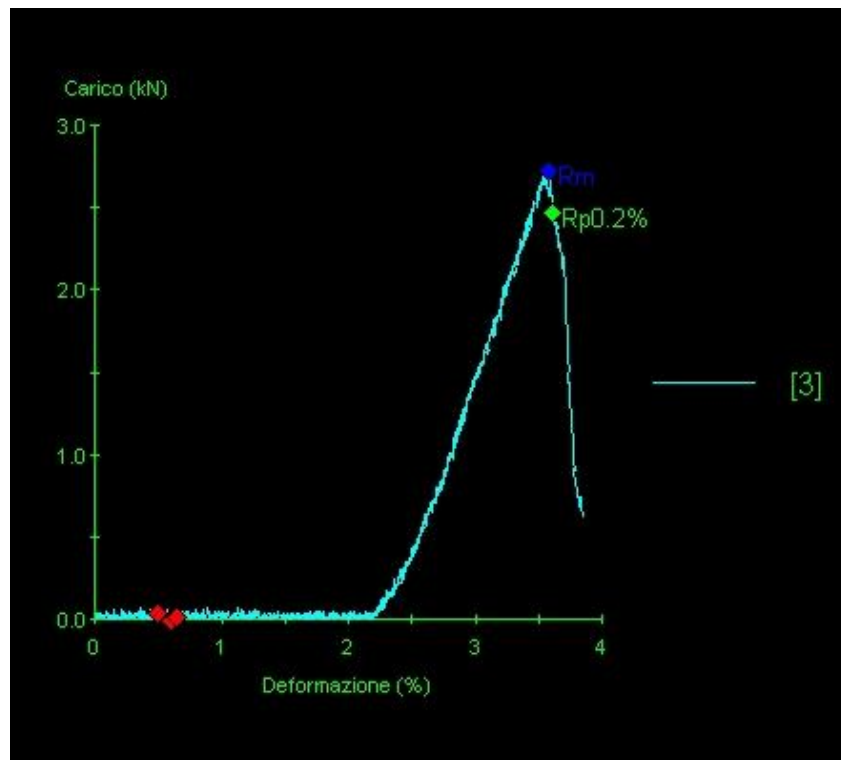


diagramma prova B

Il carico di rottura minimo è stato di 2,55 KN, mentre quello massimo è stato di 2.90 KN. E' stato riportato il diagramma del provino che ha presentato tensione di rottura massima.

Dall'esame del diagramma si nota il comportamento fragile del provino ed il valore della freccia che registriamo è di circa 1,3 mm. Si evince inoltre un modulo elastico abbastanza elevato visto che la curva carico- spostamento risulta essere piuttosto

impennata. Dobbiamo quindi vedere quale è il comportamento della malta andando ad aumentare la percentuale di lattice nel componente liquido del composto. Per fare ciò passiamo alle prove successive.

Prove C

- Composizione: cemento alluminoso e lattice (nelle proporzioni 2,9 : 1);
- Lattice: presente nell'impasto ed idrato al 70%;
- Sono state disperse fibre corte nell'impasto nell'1% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 5 mm;

Sia appena realizzati i provini che dopo la stagionatura, di circa 2 settimane, non si notano crepe né lattice sulla superficie degli stessi.

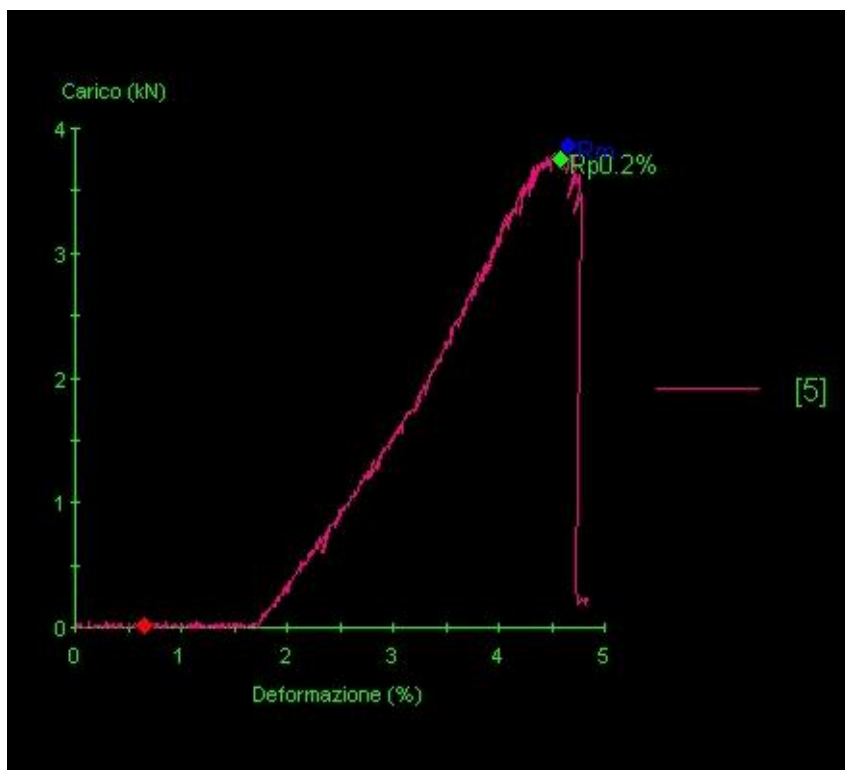


diagramma prova C

Il carico di rottura minimo è stato di 3,40 KN, mentre quello massimo è stato di 3.70 KN. E' stato riportato il diagramma del provino che ha presentato tensione di rottura massima. Questo composto presenta un carico di rottura superiore ai provini B. Dall'analisi di questo diagramma si nota subito l'elevato valore della freccia, che risulta essere raddoppiata al valore delle prove precedenti. Si può leggere infatti dal diagramma un valore di quasi 3mm. Questo comportamento indica che il materiale possiede un modulo elastico minore del caso precedente ed è quindi più facilmente deformabile, il tutto è chiaramente legato al fatto che abbiamo aumentato la percentuale di lattice. Infine, dopo la rottura, notiamo la caduta quasi verticale del carico applicato, indice di una rottura di schianto.

Abbiamo confermato, quindi, la validità dei risultati ottenuti nella fase di caratterizzazione, e cioè che la presenza delle fibre corte disciolte è indispensabile per la resistenza meccanica della malta e che la percentuale di lattice che conferisce al composito una maggiore resistenza a flessione è quella del 30%. Fissando, allora, questo valore di lattice abbiamo verificato se una quantità maggiore di fibre corte, disciolte nella malta, fosse vantaggiosa ai fini di un miglioramento delle proprietà meccaniche. Siamo così passati dall'1% al 2 % di fibre corte.

Prove D

- Composizione: cemento alluminoso e lattice (nelle proporzioni 2,9 : 1);
- Lattice: presente nell'impasto ed idrato al 70%;
- Sono state disperse fibre corte nell'impasto nel 2% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 5 mm

Sia appena realizzati i provini che dopo la stagionatura, di circa 2 settimane, non si notano crepe né lattice sulla superficie degli stessi, tuttavia la malta presenta un aspetto terroso una volta applicata sul mattone.

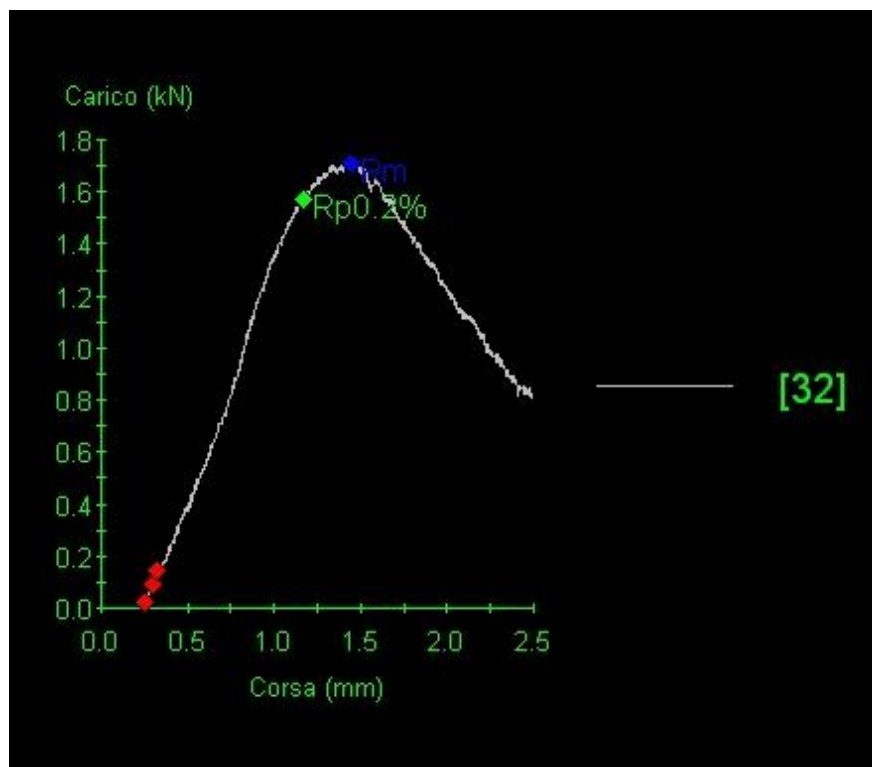


diagramma prova D

Il carico di rottura minimo è stato di 1,50 KN, mentre quello massimo è stato di 1,69 KN. E' stato riportato il diagramma del provino che ha presentato tensione di rottura massima.

Notiamo subito, aldilà dell'andamento della curva carico-spostamento per la quale si possono fare le solite osservazioni, un carico di rottura nettamente inferiore ai casi precedenti. Questo risultato non è di immediata interpretazione, quindi cercheremo di dare una spiegazione plausibile.

La presenza di una quantità maggiore di fibre corte (il doppio nel nostro caso) certamente implica una difficoltà superiore a rendere omogeneo l'impasto, in quanto c'è una tendenza più spinta delle fibre a raccogliersi e formare i cosiddetti "grumi", inficiando così le caratteristiche meccaniche della malta.

Infatti quando la cricca, avanzando, incontra un grumo, non essendoci continuità di materiale cementizio, non fa altro che accelerare la sua corsa (è come se incontrasse un tratto a resistenza nulla). Quindi troppe fibre nell'impasto non permettono al cemento di amalgamarsi con il componente liquido, presentando così un comportamento terroso.

Visto l'esito negativo di tale prova, abbiamo indagato su una lunghezza maggiore delle fibre corte. Nella fase di caratterizzazione abbiamo visto che non c'è differenza di proprietà esplicate dalla malta nel passare da fibre corte di 3-4mm a 7-8mm (cioè mantenendosi sempre al di sotto del cm). Quindi vogliamo, ora, vedere se miscelando nel cemento fibre corte aventi lunghezza superiore al cm, la malta presenti o meno qualità superiori. Passiamo, perciò, alle prove successive dove

abbiamo considerato fibre corte aventi lunghezza di circa 3cm, ritornando alla percentuale unitaria di fibre.

Prove E

- Composizione: cemento alluminoso e lattice (nelle proporzioni 2,9 : 1);
- Lattice: presente nell'impasto ed idrato al 70%;
- Sono state disperse fibre corte nell'impasto nell'1% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 3cm;

Sia appena realizzati i provini che dopo la stagionatura, di circa 2 settimane, non si notano crepe né lattice sulla superficie degli stessi.

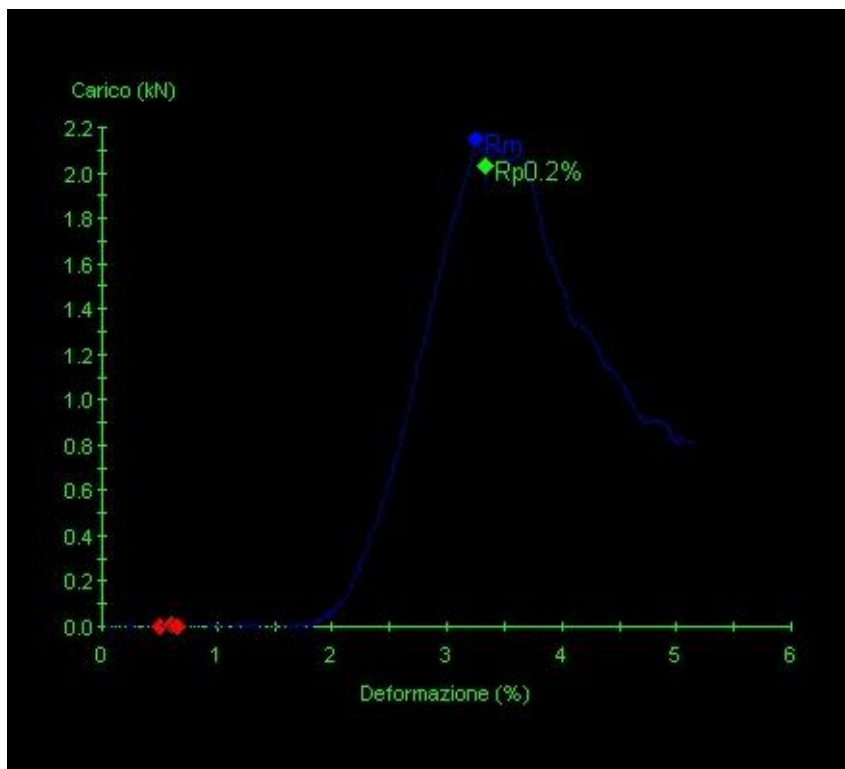


diagramma prova E

Il carico di rottura minimo è stato di 1,35 KN, mentre quello massimo è stato di 2,2 KN. E' stato riportato il diagramma del provino che ha presentato tensione di rottura massima.

Anche in questo caso notiamo come i valori dei carichi di rottura siano nettamente inferiori al migliore dei provini precedenti.

Cercheremo di dare un'interpretazione, anche in questo caso, al risultato ottenuto e cioè alla diminuita resistenza a flessione.

Nell'impastare le fibre corte con il cemento, le stesse mostravano una tendenza a perdere la loro forma rettilinea, data l'elevata flessibilità, e a ripiegarsi su se stesse, quasi a formare delle palline. Una volta che al cemento è stato aggiunto il componente liquido, è aumentata ancor di più tale tendenza, avendosi così ciuffi di fibre appallottolate; perciò all'interno del cemento le fibre sono rimaste, nella grande maggioranza, in una forma tale che non consente loro di poter esplicare una buona resistenza a trazione.

Possiamo perciò dedurre che le fibre corte devono avere una lunghezza quanto più piccola possibile in modo da essere più rigide e perciò rimanere dritte, all'interno del composto, senza ripiegarsi su sé stesse. Così quando saranno sollecitate potranno esplicare la loro massima resistenza a trazione. Abbiamo, però, visto dalle precedenti esperienze che una lunghezza inferiore al cm presentava uguali caratteristiche. Quindi l'importante è mantenersi entro tale limite.

6.3.2 Realizzazione dei chiodi

Prendendo spunto dalle fibre di acciaio, utilizzate per armare il calcestruzzo, abbiamo aggiunto alla malta, che stiamo studiando, delle fibre di carbonio aventi un'elevata rigidità, in modo tale da conservare sempre la loro geometria rettilinea all'interno della stessa e così esplicare massima resistenza a trazione.

Abbiamo, quindi, pensato come ottenere un prodotto simile che poi chiameremo “chiodo” proprio per la sua rigidità che gli consente di non piegarsi su se stesso anche miscelandolo con il cemento. Abbiamo fatto varie esperienze impregnando fasci da 4, 6, 8 tows di fibre di carbonio con la resina (fig. 6.14) e fasci da 6, 8, 10 tows con il lattice (fig. 6.15).

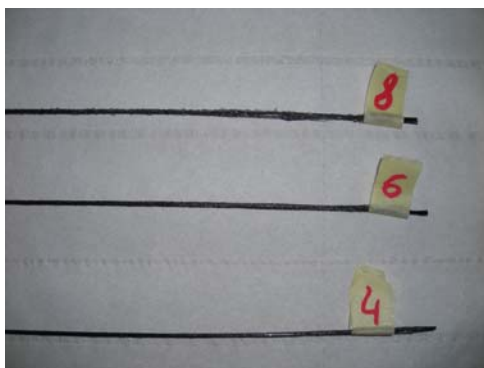


fig. 6.14 fibre impregnate con la resina

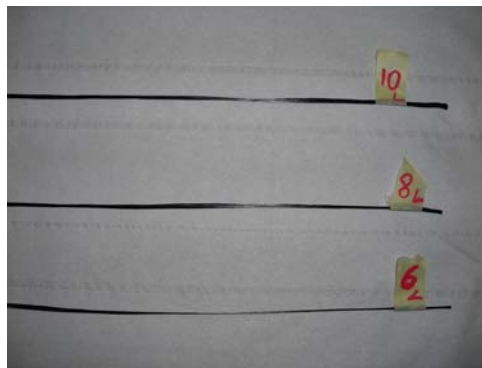


fig. 6.15 fibre impregnate con il lattice

Si è visto subito che i fasci impregnati con il lattice si presentavano troppo flessibili e quindi non utili per il nostro obiettivo. L'attenzione, perciò, si è spostata sull'impregnazione con la resina in quanto conferisce ai fasci una maggiore rigidità rispetto all'impregnazione con il lattice. Per aumentare ulteriormente la rigidità del fascio abbiamo provato ad

attorcigliare, leggermente, le fibre; tale espediente si è dimostrato positivo in quanto si è effettivamente riscontrato un aumento della rigidità. Infine, visto che la superficie del fascio impregnato con la resina, una volta polimerizzata, si mostrava troppo liscia e quindi di difficile aderenza con la malta, abbiamo pensato di migliorare tale aderenza sabbando i fasci impregnati, prima che polimerizzassero, con una polvere di quarzo (fig.6.16).

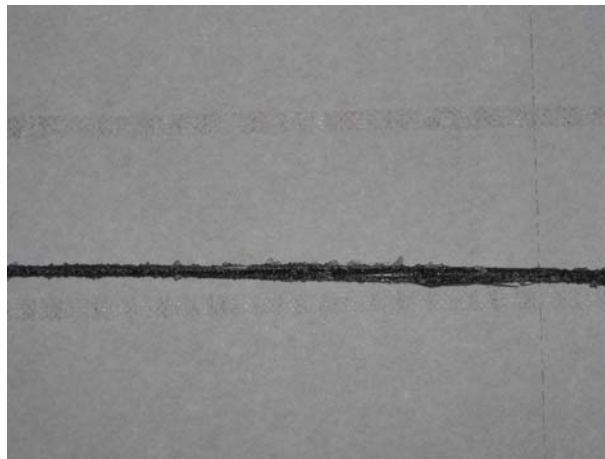


fig. 6.16 fascio di fibre impregnato con la resina e poi sabbato

Abbiamo scelto il fascio costituito da 4 tows di fibre di carbonio, in quanto noi vogliamo che esso sia rigido però nello stesso tempo vogliamo che si porti a rottura una volta sollecitato all'interno della malta. Scegliendo perciò quello da 4 tows abbiamo cercato di ottenere il giusto compromesso tra rigidità e resistenza offerta dal fascio. Infatti un fascio costituito da un numero troppo elevato di tows presenterebbe una resistenza troppo elevata e quindi molto difficilmente potrebbe essere portato a rottura quando sollecitato nella malta. Il chiodo così ottenuto presenta un diametro di circa 2 mm (fig. 6.17).

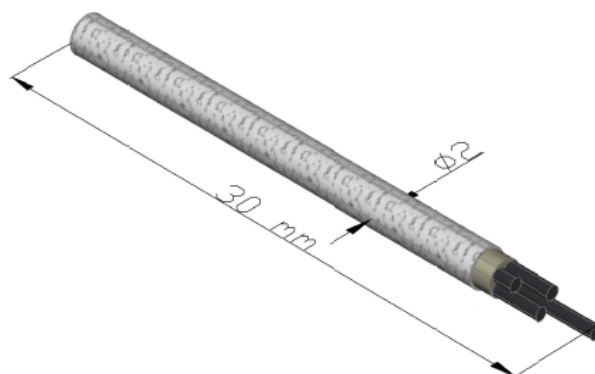


fig. 6.17 Disegno del chiodo

Abbiamo, in seguito, effettuato una serie di prove considerando come variabili la lunghezza e la percentuale dei “ chiodi” nella malta. Quindi abbiamo realizzato provini con chiodi di lunghezza 1,5 cm e 3 cm (fig. 6.18) e con percentuali del 5,5% e 7,5%.



fig. 6.18 chiodi di 3 cm

L'utilità di impregnare il fascio con la resina è quella di conferire rigidità al chiodo in modo tale da rimanere dritto all'interno della malta e, possibilmente, far lavorare a trazione contemporaneamente i 4 tows, che lo costituiscono, una volta sollecitati. Infine anche per i chiodi, come per le fibre corte, dobbiamo evitare gli accumuli e rendere l'impasto quanto più omogeneo possibile, affinché la distribuzione dei chiodi nelle sezioni sia uniforme. A tal fine abbiamo messo i chiodi nel cemento ancora in polvere (fig. 6.19) e, dopo averli dispersi, abbiamo aggiunto il lattice (fig. 6.20).



fig. 6.19 Cemento e chiodi



fig. 6.20 Cemento, chiodi e lattice

6.3.3 Seconda fase di prove

Prove F

- Composizione: cemento alluminoso e lattice (nelle proporzioni 2,9 : 1);
- Lattice: presente nell'impasto ed idrato al 70%;
- Sono state disperse fibre corte nell'impasto nell'1% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 5mm;
- Sono stati, altresì, dispersi nell'impasto CHIODI nel 5,5% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 1,5cm;

Sia appena realizzati i provini che dopo la stagionatura, di circa 2 settimane, non si notano crepe né lattice sulla superficie degli stessi.

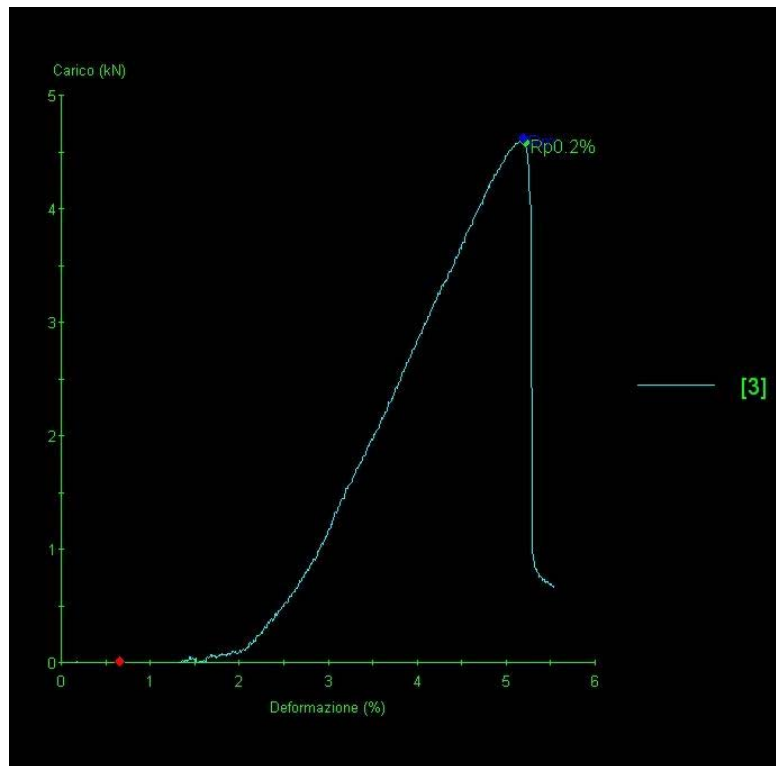


diagramma prova F

Il carico di rottura massimo è stato di 4,22 KN, mentre quello massimo è stato di 4,8 KN. E' stato riportato il diagramma del provino che ha presentato tensione di rottura massima. Notiamo subito che con il miglior risultato dei provini F si è avuto un aumento del carico di rottura di poco più del 20% rispetto al miglior risultato dei provini C (caratterizzati dallo stesso tipo di malta ed aventi in meno solo i chiodi) che presentava un carico di rottura di 3,65 KN. Dall'analisi del diagramma si può vedere che, oltre all'aumento significativo del carico di rottura, non si è avuto altro cambiamento. Infatti il modulo di elasticità ed il valore della freccia restano pressappoco invariati, ed infine anche il tipo di rottura risulta essere quello fragile che è tipico dei materiali compositi. Dall'analisi della sezione rotta dei due

mattoni si può vedere che i chiodi non sono stati portati a rottura e perciò fuoriescono dalla malta (fig 6.21).



Fig. 6.21 Sezione di rottura

Quindi si può dire che essi hanno contribuito ad innalzare la resistenza a flessione fino al punto in cui hanno cominciato a scorrere nel cemento portando così a rottura il provino. Visto, però, il tipo di rottura di schianto, si può dedurre che la loro ridotta lunghezza ha fatto sì che il tempo di scorrimento nella malta fosse molto veloce, praticamente istantaneo.

Tuttavia possiamo affermare che l'introduzione dei chiodi, di lunghezza 1,5cm, nella malta ha avuto un buon esito; siamo, perciò, più stimolati a vedere quale sarà il comportamento della malta aumentando la percentuale e la lunghezza dei chiodi, passiamo dunque alle prove successive.

Prove G

- Composizione: cemento alluminoso e lattice (nelle proporzioni 2,9 : 1);
- Lattice: presente nell'impasto ed idrato al 70%;
- Sono state disperse fibre corte nell'impasto nell'1% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 5mm;
- Sono stati, altresì, dispersi nell'impasto CHIODO nel 7,5% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 1,5cm;

Sia appena realizzati i provini che dopo la stagionatura, di circa 2 settimane, non si notano crepe né lattice sulla superficie degli stessi.

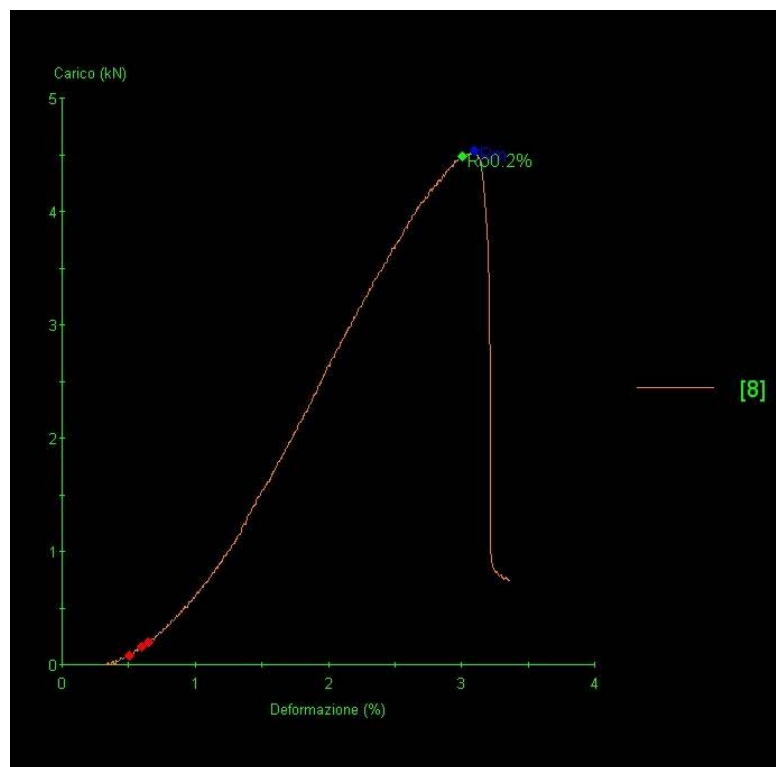


diagramma prova G

Il carico di rottura minimo è stato di 3,4 KN, mentre quello massimo è stato di 4,5 KN. E' stato riportato il diagramma del provino che ha presentato tensione di rottura massima.

Notiamo subito, anche in questo caso, che il miglior risultato dei provini G presenta un carico di rottura superiore al migliore dei provini C. E' evidente, però, che la malta risulta meno lavorabile che nel caso avente percentuale 5,5 di chiodi, presentando inoltre un tempo utile di applicazione sul supporto molto basso, in quanto tende molto velocemente ad indurire. Analizzando il diagramma si possono fare le stesse osservazioni dei provini precedenti (provini F) per quanto riguarda il modulo elastico ed il valore della freccia.

In definitiva abbiamo verificato che aumentare la percentuale di chiodi fa sì che aumenti la probabilità di avere nella sezione di rottura una maggiore presenza di chiodi, per contro però si hanno problemi di lavorabilità della malta e tempi utili di applicazione della stessa sul supporto molto bassi.

Vediamo, ora, quale sarà il comportamento della malta aumentando la lunghezza dei chiodi. Passiamo allora alle prove successive.

Prove H

- Composizione: cemento alluminoso e lattice (nelle proporzioni 2,9 : 1);
- Lattice: presente nell'impasto ed idrato al 70%;

- Sono state disperse fibre corte nell'impasto nell'1% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 5mm;
- Sono stati, altresì, dispersi nell'impasto CHIODI nel 5,5% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 3cm;

Sia appena realizzati i provini che dopo la stagionatura, di circa 2 settimane, non si notano crepe né lattice sulla superficie degli stessi.

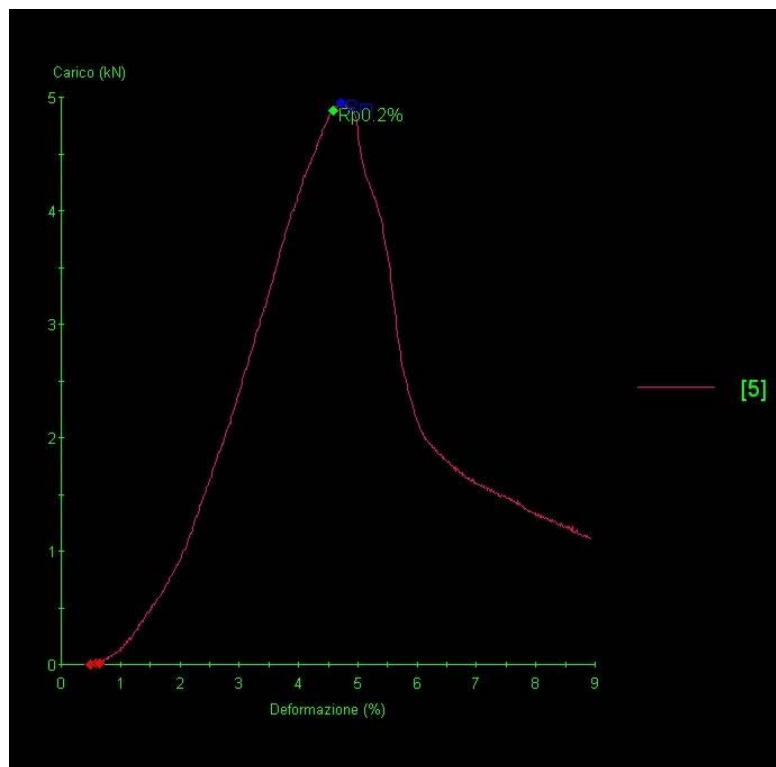


diagramma prova H

Il carico di rottura minimo è stato di 3,6 KN, mentre quello massimo è stato di 5,0 KN. E' stato riportato il diagramma del provino che ha presentato tensione di rottura massima.

Notiamo subito che con i provini H si è avuto un aumento del carico di rottura di quasi il 30% rispetto ai provini C; questo è il miglior risultato ottenuto. Oltre all'evidente aumento del carico di rottura si evince, analizzando il diagramma, che è la prima volta che ci troviamo di fronte ad un tipo di rottura non fragile, bensì di tipo duttile. Ciò sicuramente è dovuto alla lunghezza maggiore del chiodo, rispetto ai provini precedenti. Analizzando la sezione di rottura abbiamo notato, anche in questo caso, come i chiodi non sono stati portati a rottura ma fuoriescono dalla malta (fig.6.22).



Fig. 6.22 Sezione di rottura

Quindi i chiodi hanno contribuito ad innalzare la resistenza a flessione fino al punto in cui hanno cominciato a scorrere nel cemento portando così a rottura il provino. Data, però, la loro maggiore lunghezza il tempo di scorrimento è stato maggiore e ciò ha portato ad una rottura non istantanea bensì graduale.

Questo perché la superficie di contatto tra chiodo e malta è maggiore e perciò si ha una τ di scorrimento maggiore. In altre parole è più facile far delaminare un chiodo di 1.5 cm che non uno lungo 3 cm. Osservando i valori del minimo e massimo carico di rottura si nota una marcata differenza di risultato che può essere interpretata, analizzando anche le rispettive sezioni di rottura, nel senso che dipende dalla quantità di chiodi presenti nelle stesse. Laddove maggiore è la quantità, maggiore è il carico ultimo di rottura. Per quanto riguarda il modulo elastico, infine, questo è praticamente invariato; il valore della freccia, invece, risulta essere nettamente maggiore visto il diverso tipo di rottura.

Vediamo ora cosa succede aumentando la percentuale di chiodi di lunghezza 3 cm, per questo passiamo alle prove successive.

Prove I

- Composizione: cemento alluminoso e lattice (nelle proporzioni 2,9 : 1);
- Lattice: presente nell'impasto ed idrato al 70%;
- Sono state disperse fibre corte nell'impasto nell'1% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 5mm;
- Sono stati, altresì, dispersi nell'impasto chiodi nel 7,5% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 3cm;

Sia appena realizzati i provini che dopo la stagionatura, di circa 2 settimane, non si notano crepe né lattice sulla superficie degli stessi.

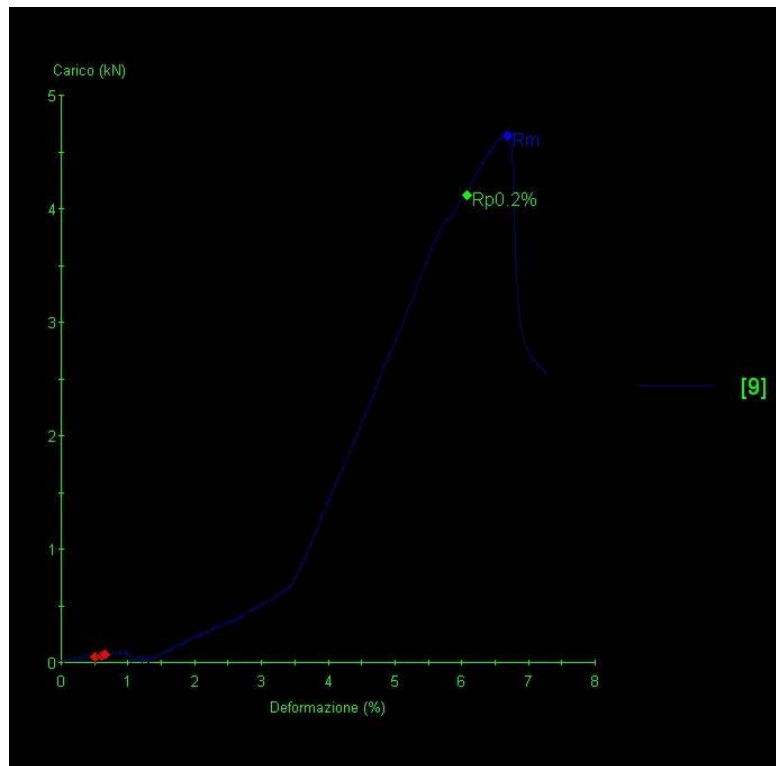


diagramma prova H

Il carico di rottura minimo è stato di 3,2 KN, mentre quello massimo è stato di 4,8 KN. E' stato riportato il diagramma del provino che ha presentato tensione di rottura massima.

Anche in questo caso vediamo subito che con il provini I si è avuto un notevole incremento rispetto ai provini C. Si è avuta una rottura graduale, dovuta come prima, alla maggiore lunghezza dei chiodi. Il consistente divario fra il valore massimo e quello minimo del carico di rottura è dovuto, analizzando le sezioni di rottura, alla diversa distribuzione dei chiodi nella stessa. Il modulo elastico resta sempre invariato; il valore della freccia resta più o meno invariato rispetto alla prove H, mentre risulta più grande rispetto alla prove C.

In definitiva si può dire che inserendo i chiodi di lunghezza di 3 cm, nella malta, ci troviamo di fronte, per la prima volta, ad una rottura graduale e non fragile, tipica dei materiali compositi.

6.3.4 Analisi dei risultati

In questo capitolo abbiamo descritto tutta la fase di prove effettuate applicando la malta sul supporto (mattoncino pieno). In primo luogo abbiamo confermato una serie di risultati che si erano già intravisti nella fase di caratterizzazione della malta: la presenza delle fibre corte disciolte è indispensabile per la resistenza meccanica; la percentuale che conferisce al composito maggiore resistenza a flessione è quella del 30%. Siamo così passati ad effettuare nuovi studi della malta modificando alcuni parametri. Quindi abbiamo visto cosa accadeva aumentando la percentuale di fibre disciolte ed aumentando la lunghezza delle stesse; infine abbiamo introdotto un nuovo elemento nella malta, cioè il chiodo, ed abbiamo visto il comportamento della stessa per diversi valori di lunghezza e percentuale di chiodi.

Riportiamo, nelle tabelle in basso, i risultati scaturiti dalle prove di flessione su due mattoni con strato di rinforzo :

Composizione	Lattice	Fibre corte	Carico (KN)
Cemento alluminoso ed acqua 3,3:1	Assente	1% *	Esito negativo

Cemento alluminoso e lattice 2,9:1	Idrato all' 80%	1% *	2,72
Cemento alluminoso e lattice 2,9:1	Idrato al 70%	1% *	3,58
Cemento alluminoso e lattice 2,9:1	Idrato al 70%	2% *	1,65
Cemento alluminoso e lattice 2,9:1	Idrato al 70%	1% **	1,85

Tabella 1

** fibre corte di 5 mm*

*** fibre corte di 3 cm*

Note: è indicato il valor medio delle prove (in KN)

Composizione	Lattice	Fibre corte	Chiodi	Carico (KN)
Cemento alluminoso e lattice 2,9:1	Idrato al 70%	1% *	5,5 % & 1,5 cm	4,55
Cemento alluminoso e lattice 2,9:1	Idrato al 70%	1% *	5,5 % & 3 cm	4,4
Cemento alluminoso e lattice 2,9:1	Idrato al 70%	1% *	7,5 % & 1,5 cm	4,3
Cemento alluminoso e lattice 2,9:1	Idrato al 70%	1% *	7,5 % & 3 cm	3,85

Tabella 2

** fibre corte di 5 mm*

Note: è indicato il valor medio delle prove (in KN)

Si può notare, dalla tabella 1, come la maggiore percentuale di fibre corte, così come la maggiore lunghezza delle stesse non

abbiano fatto altro che peggiorare le cose, inficiando sulla resistenza a flessione della malta. Dalla tabella 2, si evince che la presenza dei chiodi è comunque vantaggiosa, indipendentemente dalla lunghezza e dalla percentuale considerata, ai fini della resistenza a flessione. Ricordando, però, le difficoltà incontrate nel gestire una percentuale del 7,5% di chiodi, risulta ovviamente preferibile una percentuale minore e cioè quella del 5,5 %.

Per quanto riguarda la lunghezza del chiodo è preferibile quella maggiore delle due considerate, cioè di 3 cm, in quanto a parità di risultati in termini di carico di rottura, tale lunghezza comporta un tipo di rottura graduale, cosa sicuramente vantaggiosa ai fini di una applicazione edilizia.

Prove di compressione su provini in muratura

7.1 Studi teorici

Per la simulazione vera e propria di messa in opera del nostro prodotto abbiamo fatto riferimento alla norma ASTM E519-74.

Questa norma prevede una prova di compressione diagonale secondo lo schema riportato di seguito (fig. 7.1).

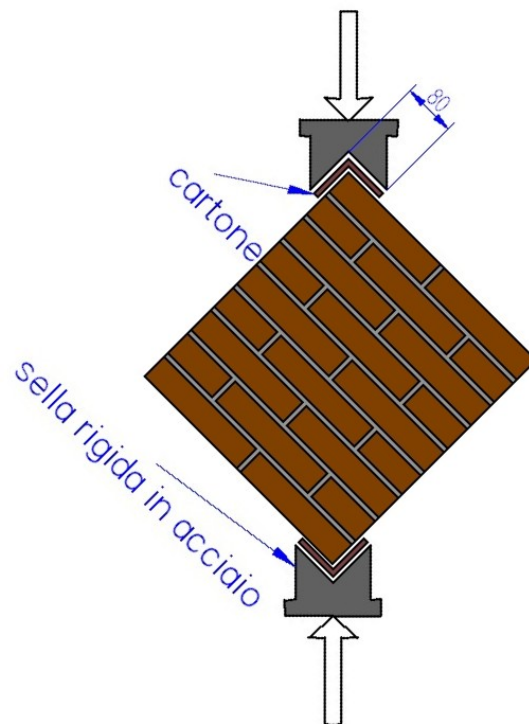


Fig. 7.1 Modalità di carico del provino

Si effettua questa prova al fine di valutare la τ_k (sforzo di taglio critico) al centro del pannello (fig. 7.2) .

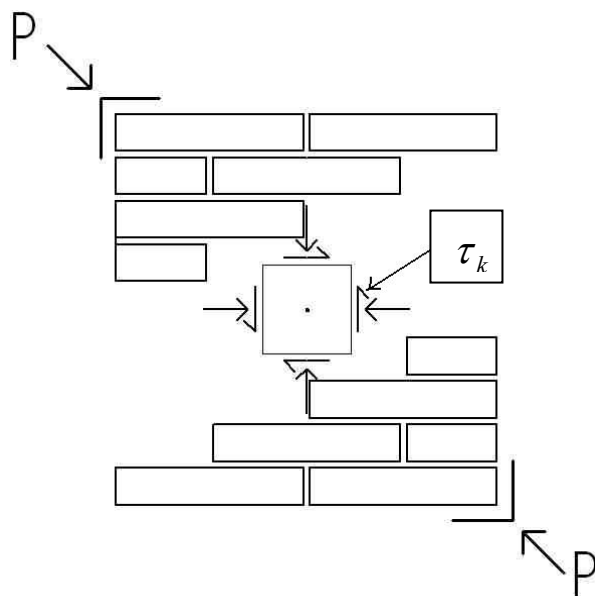


Fig. 7.2 Stato tensionale al centro del pannello

Questa prevede che il campione abbia una dimensione di $1,2\text{m} \times 1,2\text{ m}$; data però la difficoltà di movimentare provini di tali dimensioni per l'elevato peso proprio e la volontà di condurre una prima serie di prove preventive, si sono ridotte le dimensioni di circa $1/3$, in modo da rispettare la forma quadrata del pannello in base alle dimensioni standard del mattone.

Il pannello tipo ha una dimensione media di $0,520\text{ m}$ per uno spessore di $0,105\text{ m}$, con giunti di malta di spessore medio di 1 cm apparecchiando i mattoni secondo lo schema di seguito riportato (fig. 7.3).

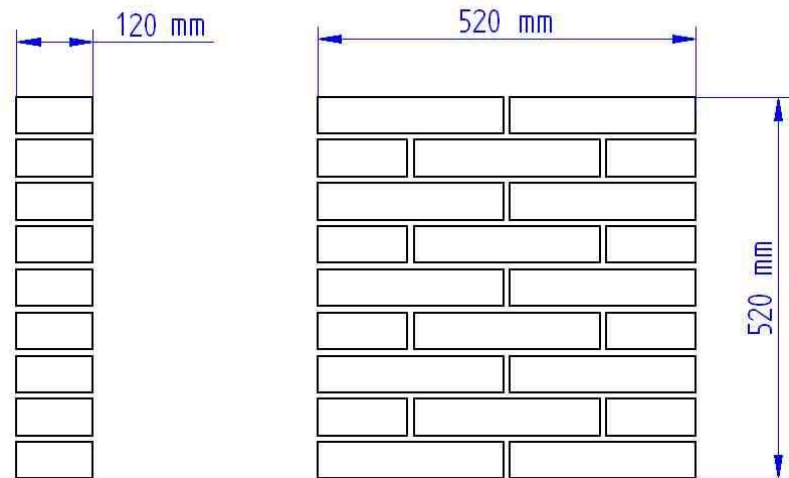


Fig. 7.3 Apparecchiatura del campione e sue dimensioni

La dimensione contenuta del pannello rispetto alle prescrizioni normative ASTM non inficiano i risultati delle prove, consentendo di realizzare un numero più significativo di prove sperimentali.

7.2 Scopo della prova

La prova a taglio è condotta al fine di valutare lo sforzo di taglio critico τ_k al centro del pannello ed i meccanismi di crisi, ovvero l'interazione tra supporto in muratura e rinforzo.

Il valore di τ_k definito analiticamente dall'elaborazione di dati sperimentali, per ogni singolo campione, viene mediato dai valori scaturiti dalla medesima tipologia di rinforzo e rapportato al valore attuale ottenuto per i campioni di riferimento.

Nel seguito indicheremo con τ_k il valore dello sforzo di taglio del provino rinforzato, mentre indicheremo con τ_{k0} lo sforzo di taglio del provino non rinforzato.

Il rapporto τ_k/τ_{k0} indica quindi l'incremento di resistenza apportato dall'applicazione del rinforzo.

7.3 Meccanismi di collasso dei pannelli murari

Un'osservazione è indispensabile per comprendere il percorso seguito. Riferendosi ai meccanismi di collasso di pannelli murari caricati monotonicamente e quasi staticamente è possibile osservare i seguenti meccanismi di crisi corrispondenti ad altrettanti stati limite:

1. fessurazione diagonale “a scaletta” per scorrimento fra malta e mattoni al centro della parete;
2. fessurazione diagonale per tensioni di trazione limiti sulle giaciture con traccia parallela alla diagonale compressa, al centro della parete;
3. schiacciamento degli angoli compressi.

Per ognuno di questi stati limite è possibile calcolare il corrispondente carico limite P_{lim} in funzione della geometria (h ; t) e delle caratteristiche meccaniche del materiale (f_c resistenza di compressione nella muratura; f_t resistenza di trazione nella muratura).

7.4 Calcolo analitico della sollecitazione di taglio e della resistenza a trazione

Di seguito si riporta brevemente la procedura di calcolo seguita per la determinazione della τ_k . Lo stato tensionale al centro del pannello, in corrispondenza di un intorno infinitesimo del punto A è rappresentato nello schema di seguito riportato (fig. 7.4).

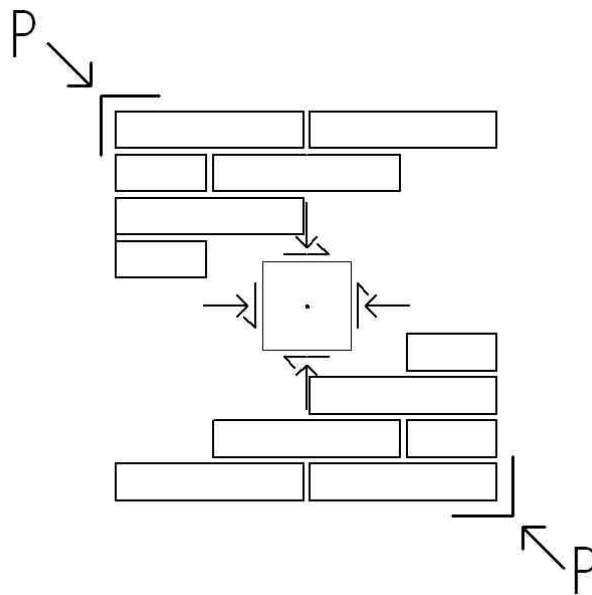


Fig. 7.4 Stato tensionale al centro del pannello

Una volta noto, in seguito alla prova, il valore del carico P e le dimensioni del pannello possiamo conoscere il valore della τ_m , tensione tangenziale media valutata sulla sezione orizzontale del pannello (h,x,t):

$$\tau_m = P \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{1}{h \cdot t} \quad (7.1)$$

ove: P carico di compressione diagonale applicato in N

h lato del quadrato del pannello in mm

t spessore del pannello in mm

La resistenza a trazione è valutata dalla seguente relazione:

$$0,73 \cdot \tau_m = f_t \quad (7.2)$$

sostituendo il valore di τ_m con l'espressione (7.1) si ottiene:

$$0,73 \cdot P \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{1}{h \cdot t} = f_t \quad (7.3)$$

che consente di definire il valore del carico limite:

$$P_{\text{lim}} = \frac{\sqrt{2}}{0,73} \cdot f_t \cdot h \cdot t \quad (7.4)$$

Dalla sperimentazione si determina il valore del carico massimo, noti i dati geometrici, si risale al valore della resistenza a trazione della muratura f_t espresso dalla relazione (7.3).

Le condizioni di prova riprodotte sperimentalmente sono vicine a quello che si verifica in un pannello murario reale sollecitato da azioni verticali (carichi soprastanti) e da una forza orizzontale (forza statica equivalente in zona sismica). Alcuni ricercatori hanno formulato dei criteri di resistenza ipotizzando che la muratura sia un materiale

omogeneo ed isotropo determinando lo stato di sforzo nel centro del pannello, presupponendo un funzionamento elastico-lineare fino all'innescio della fessura.

Tra i criteri di resistenza ci si è riferiti a quello di Turnsek-Cacovic secondo cui:

$$\sigma_I = f_t = -\frac{\sigma_c}{2} + \sqrt{(1,5 \cdot \tau_m)^2 + \frac{\sigma_c^2}{4}} \quad (7.5)$$

$$\sigma_{II} = f_t = +\frac{\sigma_c}{2} + \sqrt{(1,5 \cdot \tau_m)^2 + \frac{\sigma_c^2}{4}} \quad (7.6)$$

La determinazione della resistenza a trazione della muratura è da intendersi come resistenza nominale, per un dato materiale, del particolare criterio impiegato. L'azione tagliante che conduce all'innescio della fessurazione del pannello può essere determinata con buona approssimazione a patto che si usufruisca di relazioni che utilizzino lo stesso criterio di crisi. La scelta del criterio di Turnsek-Cacovic è legata alla abituale procedura di calcolo definita “metodo POR” che impiega tale criterio in cui entra come dato di input il valore di τ_k , pari a:

$$\tau_k = \frac{f_t}{1,5} \quad (7.7)$$

Alcuni autori riportano la seguente relazione:

$$\tau_k = \frac{f_t}{b} \quad (7.8)$$

con b coefficiente variabile in funzione della geometria del pannello; $b = 1,5$ nel caso dei pannelli snelle, mentre $b = 1,1$ nel caso di pannello quadrato, che poi è proprio il nostro caso, in cui la (7.8) diventa:

$$\tau_k = \frac{f_t}{1,1} \quad (7.9)$$

7.5 Esecuzione della prova

I muretti, di dimensioni nominali e con orditura dei mattoni come riportato di seguito (fig. 7.5), sono stati confezionati in diversi giorni del mese di Luglio, presso il Laboratorio del Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione dell'Università degli studi di Napoli Federico II. Lasciati, poi, ad asciugare per un tempo necessario al loro utilizzo.



Fig. 7.5 Muretto non rinforzato

Riportiamo di seguito (fig.7.6) l'apparato utilizzato per realizzare le prove e la modalità di carico; si tratta della macchina MTS Alliance RT Material Test System da 500 KN, la stessa utilizzata per le prove di flessione su due mattoni.



Fig. 7.6 Esecuzione della prova

Dei muretti confezionati, tre non sono stati rinforzati con alcun composito a matrice cementizia e sono serviti a caratterizzare il muretto di partenza, utilizzato poi come riferimento. Sugli altri muretti è stato applicato, su entrambe le facce, come rinforzo una malta di diversa composizione a seconda della configurazione adottata (fig. 7.8). Anche in questa circostanza abbiamo curato l'aspetto dell'imprimitura per migliorare l'adesione del rinforzo sul muretto (fig 7.7).



Fig. 7.7 Muretto dopo l'imprimitura



Fig. 7.8 Muretto rinforzato

Designeremo, in seguito, le due configurazioni adottate nelle prove con le lettere A e B :

Configurazione A

- Composizione: cemento alluminoso e lattice (nelle proporzioni 2,9 : 1);
- Lattice: presente nell'impasto ed idrato al 70%;
- Sono state disperse fibre corte nell'impasto nell'1% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 5 mm;

Il carico di rottura minimo è stato di 174 kN, mentre quello massimo è stato di 226 kN.

Riportiamo il diagramma del provino che ha presentato tensione di rottura massima.

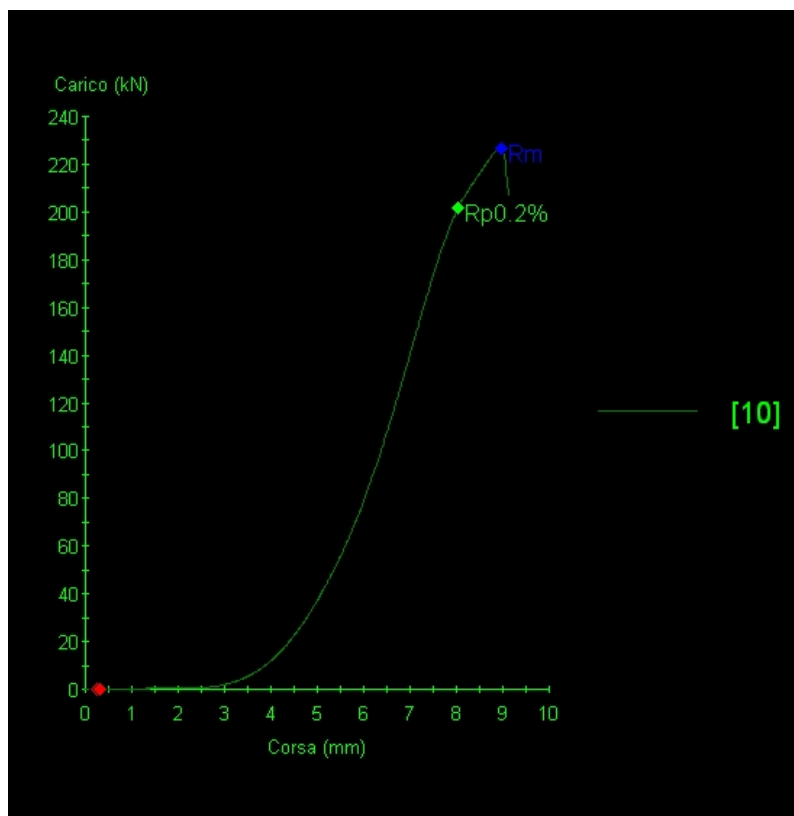


diagramma prova A

Configurazione B

- Composizione: cemento alluminoso e lattice (nelle proporzioni 2,9 : 1);
- Lattice: presente nell'impasto ed idrato al 70%;
- Sono state disperse fibre corte nell'impasto nell'1% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 5mm;

- Sono stati, altresì, dispersi nell'impasto CHIODI nel 5,5% in peso del cemento ed aventi lunghezza media di 3cm;

Il carico di rottura minimo è stato di 192 KN, mentre quello massimo è stato di 198 KN.

Riportiamo il diagramma del provino che ha presentato tensione di rottura massima.

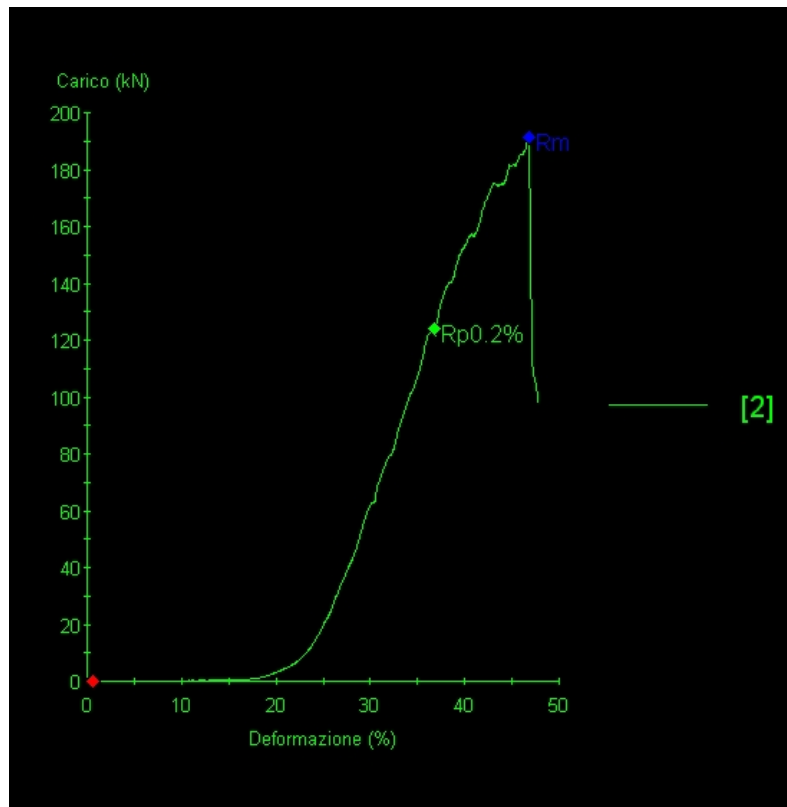


diagramma prova B

7.6 Analisi dei risultati

I risultati ottenuti in questa ultima parte della fase di sperimentazione evidenziano un incremento medio della τ_k di circa il 160%, con un picco massimo del 200% .

Gli incrementi considerevoli del carico massimo registrato sperimentalmente e della τ_k ricavata analiticamente, sono supportati da una modifica delle modalità di crisi del sistema. Se da un lato, infatti, i campioni di riferimento hanno mostrato modalità di crisi

differenti (la formazione di una fessura a scaletta lungo i giunti o scorrimento lungo il letto di malta con crisi dell'interfaccia cemento-mattone), nel caso dei campioni rinforzati le modalità di crisi si sono ricondotte ad un'unica modalità.

Il sistema infatti entra in crisi per la formazione di una fessura principale con andamento diagonale che coinvolge malta e mattoni; accanto a questa si osservano poi altre fessure secondarie con andamento parallelo ma di minore estensione.



Fig.5.27.- Fessura lungo la diagonale compressa

Il placcaggio realizzato con il sistema di rinforzo consente di incrementare la capacità portante del pannello, in quanto parte degli sforzi vengono assorbiti dal placcaggio stesso per effetto del corretto funzionamento di interfaccia tra malta fibrorinforzata e muratura. Questo corretto funzionamento è senza dubbio dovuto sia alla presenza del lattice nell'impasto, sia alla presenza delle fibre corte.

campione	P max [N]	f_t [N/mm ²]	τ_k [N/mm ²]	$\frac{\tau_k}{\tau_0}$	$\frac{P_i}{P_0}$
Riferimento*	75000	0,62	0,56	1	1
A_{max}	226000	1,86	1,69	3,02	3,01
A_{min}	174000	1,44	1,31	2,34	2,32
B_{max}	198000	1,64	1,49	2,66	2,64

B_{min}	192000	1,59	1,44	2,57	2,56
Tabella 5.3					

P_0 valore del carico del provino di riferimento

P_i valore del carico del provino i-esimo

τ_0 valore di riferimento del campione di controllo non rinforzato

τ_k valore del campione i-esimo rinforzato valutato con $b=1.1$

h valore medio della dimensione del pannello

t valore medio dello spessore del pannello

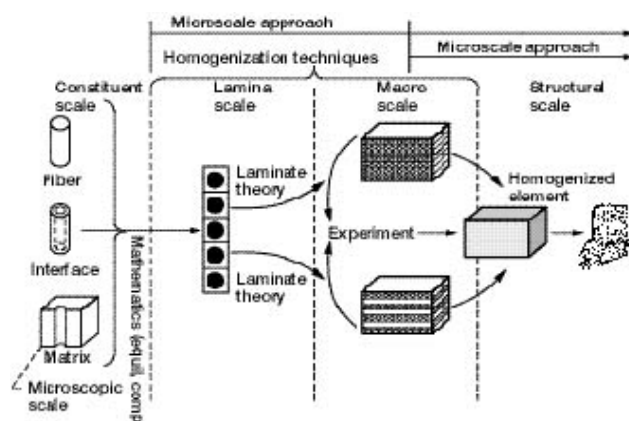
* media delle prove sui provini non rinforzati.

Micromeccanica

I materiali compositi hanno peculiarità che li distinguono in modo netto dai tradizionali materiali dell'ingegneria strutturale.

Mentre alcune caratteristiche infatti possono essere viste come variazioni del comportamento rispetto ai materiali convenzionali, altre sono completamente nuove e richiedono pertanto nuovi modelli analitici di descrizione del comportamento strutturale e appropriate procedure di analisi sperimentale.

La micromeccanica, attraverso lo studio delle interazioni tra matrice e rinforzo in scala microscopica, consente di “prevedere” in modo analitico il comportamento strutturale del composito attraverso la conoscenza delle proprietà dei suoi costituenti e di valutare come tali componenti possano essere scelti, proporzionati e disposti per ottenere particolari caratteristiche meccaniche.



In particolare è possibile, quindi, valutare il modulo elastico e il carico di rottura di un composito attraverso la conoscenza dei moduli elastici e dei carichi di rottura delle fibre e della matrice che lo costituiscono.

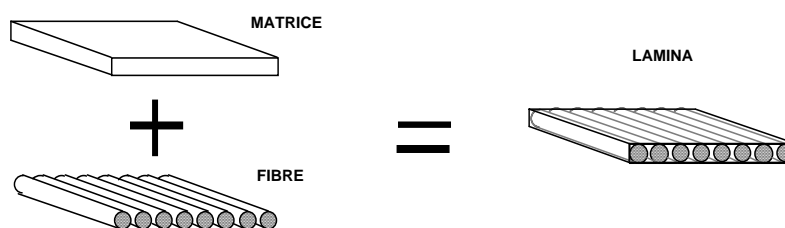
Le proprietà globali così determinate consentono di sostituire, nei problemi di equilibrio elastico, il composito eterogeneo con un materiale omogeneo equivalente.

Nelle tecniche di omogeneizzazione sono utilizzati due approcci: nel primo si impone una deformazione media, o macrodeformazione, su un elemento di volume di riferimento del composito (EVR), contenente le eterogeneità caratterizzanti la sua microstruttura, e si determina la corrispondente tensione media, o macrotensione; nel secondo si impone una tensione media sull'EVR e si determina la corrispondente deformazione media.

8.1 Compositi con fibre continue unidirezionali – La regola delle miscele

L'elemento di volume rappresentativo per i compositi a fibre continue è la lamina.

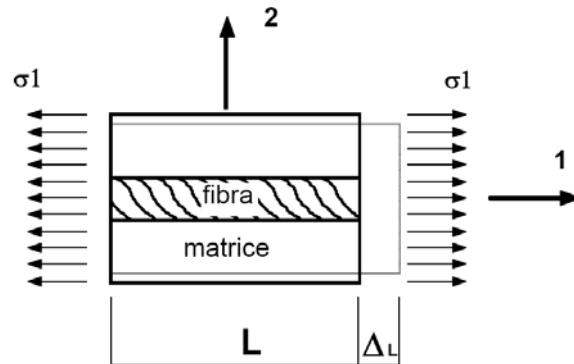
Le proprietà meccaniche della lamina dipendono essenzialmente dalle proprietà delle fibre e della matrice, dalla loro frazione volumetrica, dalla geometria della struttura, dalle modalità di sollecitazione e dall'orientazione di applicazione del carico.



Se si considera una lamina con fibre unidirezionali e carico applicato alla struttura nella direzione delle fibre, assumendo per essa un comportamento macroscopicamente omogeneo, è possibile calcolarne le proprietà elastiche imponendo opportune ipotesi:

- matrice omogenea, a comportamento lineare elastico e isotropo;
- fibre omogenee, a comportamento lineare elastico, isotrope, spaziate regolarmente e perfettamente allineate;

- perfetta adesione tra fibra e matrice;
- assenza di vuoti nel composito.



L'ipotesi di perfetta adesione assicura che, quando la lamina è sottoposta ad un carico di trazione P nella direzione delle fibre, la deformazione elastica delle fibre è uguale a quella della matrice:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_1$$

Avendo assunto elastico lineare il comportamento delle fibre e della matrice, le corrispondenti tensioni normali sono:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_1$$

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_1$$

Indicando con A_f e A_m le sezioni rette di fibre e matrice, si ha per l'equilibrio:

$$P = A_m \sigma_m + A_f \sigma_f$$

Da cui, dividendo per l'area dell'intera sezione retta A, si ricava la tensione media del composito:

$$\sigma_1 = \frac{A_m}{A} \sigma_m + \frac{A_f}{A} \sigma_f = \phi_m \sigma_m + \phi_f \sigma_f = (1 - \phi_f) \sigma_m + \phi_f \sigma_f$$

Esprimendo quest'ultima in termini di deformazione, si ha:

$$E_1 \varepsilon_1 = (1 - \phi_f) E_m \varepsilon_m + \phi_f E_f \varepsilon_f$$

Infine, dividendo per il comune valore della deformazione:

$$E_1 = (1 - \phi_f) E_m + \phi_f E_f$$

Questa formulazione del modulo di Young attraverso la micromeccanica è nota come “*regola delle miscele*” e rappresenta una variazione lineare del modulo di Young E_1 , dal valore E_m al valore E_f quando ϕ_f passa da 0 a 1.

In un lamina soggetta a trazione nella direzione delle fibre è interessante osservare come si ripartisce il carico tra fibra e matrice. Utilizzando la legge di Hooke sotto l'ipotesi di isodeformazione si ha:

$$\frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{\sigma_m}{E_m} \Rightarrow \frac{(\sigma_f A_f)}{E_f} A_m = \frac{(\sigma_m A_m)}{E_m} A_f \Rightarrow \frac{P_f}{P_m} = \frac{E_f \phi_f}{E_m \phi_m}$$

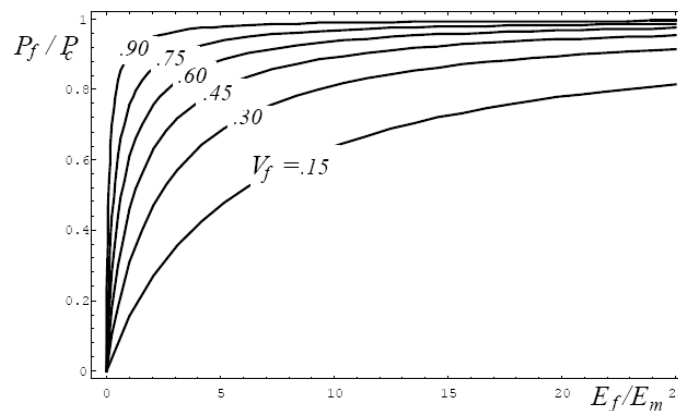
Il rapporto tra il carico sopportato dalla fibra e quello sopportato dalla matrice è quindi funzione lineare del relativo rapporto tra i moduli di Young e delle

concentrazioni. Fissata la percentuale di fibre, per un maggiore sfruttamento della resistenza della fibra, è necessario avere un elevato rapporto dei moduli di Young.

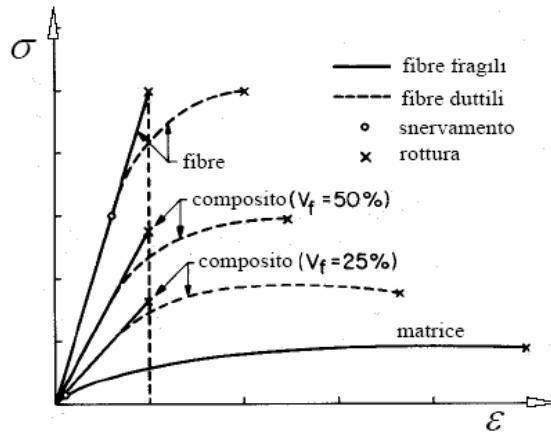
Spesso, più che al rapporto “carico fibra/carico matrice”, si fa riferimento al più utile rapporto “carico fibra/carico composito”:

$$\frac{P_f}{P_c} = \frac{E_f \phi_f}{E_m \phi_m + E_f \phi_f}$$

Si può vedere come il rapporto P_f/P_c tende ad uno anche per concentrazioni delle fibre non elevate, purché il rapporto tra i moduli di Young sia sufficientemente alto.



Considerando un composito fibro-rinforzato, l’osservazione sperimentale mostra che la rottura di una lamina avviene allorquando la deformazione longitudinale raggiunge il valore limite di rottura delle fibre. Solitamente, infatti, la matrice è caratterizzata da una deformabilità più elevata delle fibre e da una resistenza molto più bassa. In queste condizioni, la rottura del composito è governata da quella delle fibre.



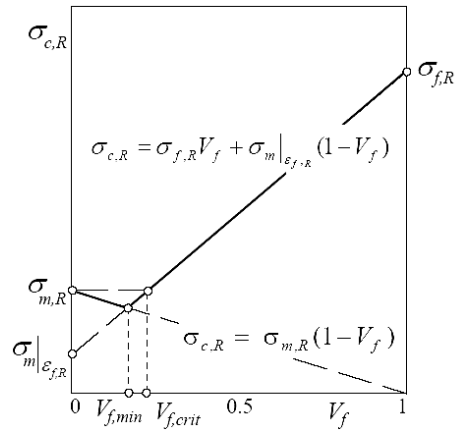
Nell'ipotesi che la rottura della lamina coincide con la rottura delle fibre, che avviene alla deformazione $\varepsilon_{f,R}$, la tensione di rottura a trazione del composito può essere ottenuta ancora con la “regola delle miscele”:

$$\sigma_{c,R} = \sigma_{f,R} \phi_f + \sigma_m(\varepsilon_{f,R})(1 - \phi_f)$$

Diagrammando $\sigma_{c,R}$ in funzione della concentrazione volumetrica delle fibre si riscontra l'esistenza di una concentrazione minima delle fibre $\phi_{f,min}$ necessaria affinché la rottura del composito coincida con quella delle fibre:

$$\phi_{f,min} = \frac{\sigma_{m,R} - \sigma_m(\varepsilon_{f,R})}{\sigma_{f,R} - \sigma_m(\varepsilon_{f,R})}$$

Evidentemente se $\phi_f < \phi_{f,min}$ la presenza delle fibre non costituisce affatto rinforzo della matrice.



8.2 Compositi con fibre corte

Come nei compositi a fibra continua, nel caso di compositi con fibre corte, gli sforzi applicati al composito vengono trasmessi all'elemento di carica attraverso tensioni tangenziali concentrate prevalentemente alle estremità delle fibre (end effect).

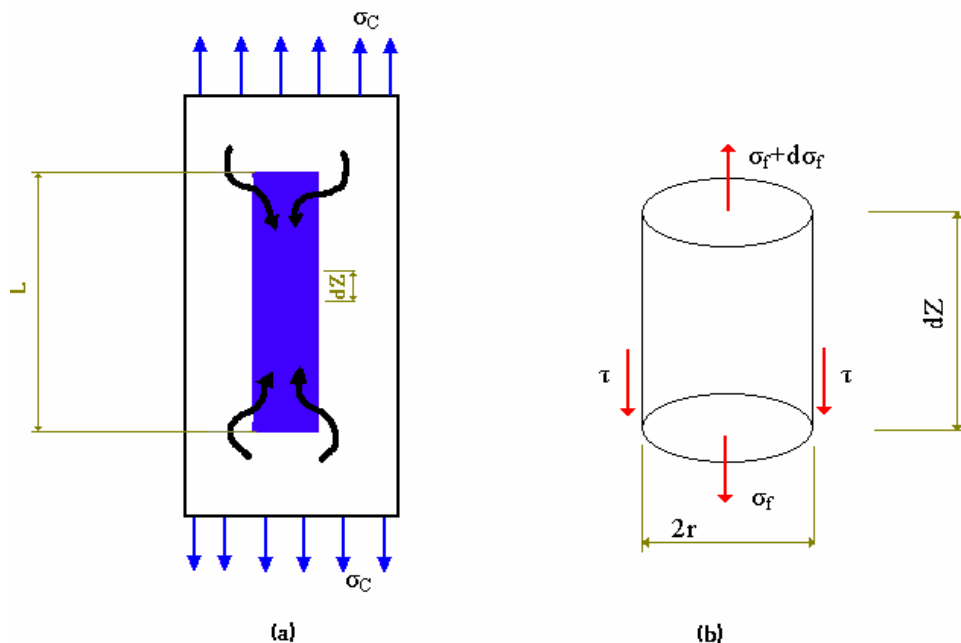
Nei compositi a fibre lunghe tali effetti d'estremità interessano una porzione di fibra trascurabile rispetto alla sua ampiezza e quindi la fibra è soggetta ad una tensione assiale uniforme su tutta la sua lunghezza.

Nei compositi a fibra corta invece, essendo la dimensione in cui avviene il trasferimento di carico dello stesso ordine di grandezza della lunghezza della fibra, essa è soggetta ad una tensione di intensità variabile lungo l'asse.

Le proprietà di un composito a fibre corte dipendono, quindi, oltre che dalle proprietà meccaniche dei due componenti (fibra e matrice) e dalla loro percentuale volumetrica, anche da:

- meccanismo di adesione fibra-matrice;
- dimensioni delle fibre, espresse attraverso il rapporto di forma (lunghezza/diametro);
- orientamento delle fibre.

Nell'ipotesi di perfetta adesione fibra-matrice e considerando entrambi a comportamento elastico con rigidezze $E_f > E_m$, si può ricavare la legge di variazione della tensione assiale lungo una fibra corta mediante la scrittura delle equazioni di equilibrio elastico per un elemento di volume costituito da una fibra a sezione retta circolare immersa in un cilindro di matrice sul quale è applicata una tensione di trazione σ_c nella direzione della fibra.



Considerando in particolare un tratto infinitesimo di fibra questo è soggetto ad una distribuzione di tensioni tangenziali sulla superficie laterale e ad una tensione normale parallela all'asse e variabile con l'ascissa z .

Per l'equilibrio alla traslazione lungo l'asse della fibra si ha:

$$\pi r_f^2 \sigma_f + 2\pi r_f \tau_i \cdot dz = \pi r_f^2 (\sigma_f + d\sigma_f)$$

Semplificando, si ottiene la relazione tra la derivata della tensione normale sulla fibra e la tensione tangenziale d'interfaccia:

$$\frac{d\sigma_f}{dz} = \frac{2\tau_i}{r_f} \quad (1)$$

L'andamento della tensione normale lungo la fibra può essere ottenuto quindi mediante integrazione dell'equazione differenziale trovata:

$$\sigma_f(z) = \sigma_f \left(-\frac{L}{2} \right) + \frac{2}{r_f} \int_{-\frac{L}{2}}^z \tau_i \cdot dz \quad (2)$$

Per determinare l'andamento della tensione normale lungo la fibra è necessario quindi conoscere:

- la tensione iniziale;
- l'andamento della tensione tangenziale sulla superficie laterale.

In generale, a causa d'inevitabili fenomeni di concentrazione delle tensioni dovute alla diversa rigidità tra fibra e matrice si

verifica facilmente il distacco fibra-matrice in corrispondenza dell'estremità e conseguentemente la tensione iniziale risulta nulla.

Anche in presenza di matrici duttili (assenza di distacco) tale tensione può essere trascurata in quanto inferiore alla tensione di rottura della matrice che in generale è piccola rispetto alle tensioni presenti nella fibra.

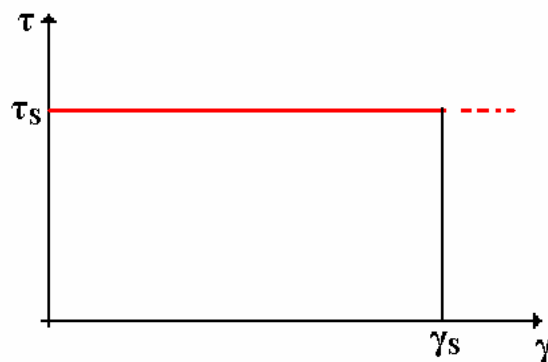
Per quanto concerne invece l'andamento della tensione tangenziale lungo la superficie laterale della fibra, essa richiede una ulteriore ipotesi sul comportamento della matrice (elastico, elastoplastico, plastico).

8.2.1 Il modello *shear lag* di Kelly-Tyson

Il modello di Kelly Tyson (1965) è stato sviluppato nello studio di materiali a matrice metallica per il quale sono attivi dei meccanismi di plasticizzazione nei pressi delle estremità delle fibre.

Per tali materiali il comportamento duttile della matrice è bene approssimato dal modello ideale di tipo rigido-perfettamente plastico: ad uno scorrimento non nullo corrisponde

una tensione tangenziale costante e pari alla tensione tangenziale di snervamento τ_s .



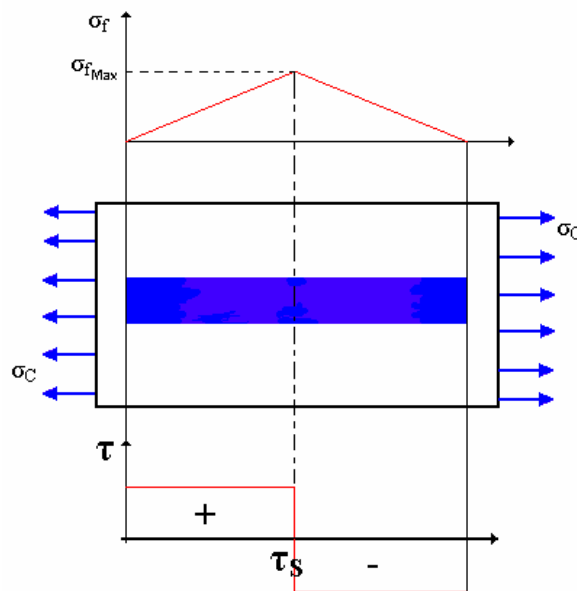
In queste condizioni la tensione tangenziale è uniforme lungo la fibra e conseguentemente la tensione normale sulla fibra varia linearmente, essendo per la (2):

$$\sigma_f(z) = \frac{2\tau_s}{r_f} \left(z + \frac{L}{2} \right) \quad (3)$$

Per la simmetria, il valore massimo di tensione si realizza in corrispondenza della mezzeria della fibra, dove si ha:

$$\sigma_f(0) = \frac{\tau_s}{r_f} L \quad (4)$$

La tensione massima per fibre corte è quindi proporzionale oltre che alla tensione di snervamento della matrice, anche alla lunghezza della fibra. Tensioni normali e tangenziali in una fibra corta hanno pertanto l'andamento rappresentato nella seguente figura:



In particolare, fissato il carico esterno applicato al composito, il carico sopportato dalla fibra (ovvero la massima tensione) risulta proporzionale alla lunghezza della fibra: diminuisce se si passa ad una fibra più corta, aumenta passando ad una fibra più lunga.

L'uso pertanto di fibre più lunghe consente di aumentare il carico sopportato da queste, ovvero consente di sfruttare maggiormente la resistenza del materiale.

Ovviamente al crescere della lunghezza della fibra la tensione normale non può crescere indefinitamente spostandosi dall'estremità verso la mezzeria.

Esiste infatti una lunghezza della fibra, detta *lunghezza di trasmissione* L_t , oltre la quale la tensione assume, nel tratto centrale, un andamento costante in quanto il carico risulta completamente trasmesso dalla matrice alla fibra attraverso le tensioni tangenziali che si sviluppano nei due tratti d'estremità della fibra.

Per tali valori della lunghezza, nel tratto centrale pertanto non si ha più trasferimento di carico e quindi risulta nulla la tensione tangenziale e costante la tensione normale sulla fibra.

Nel tratto centrale della fibra si raggiunge cioè la stessa condizione di carico delle fibre lunghe, pertanto:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f$$

da cui si ottiene il valore della tensione (massima) presente nel tratto centrale della fibra:

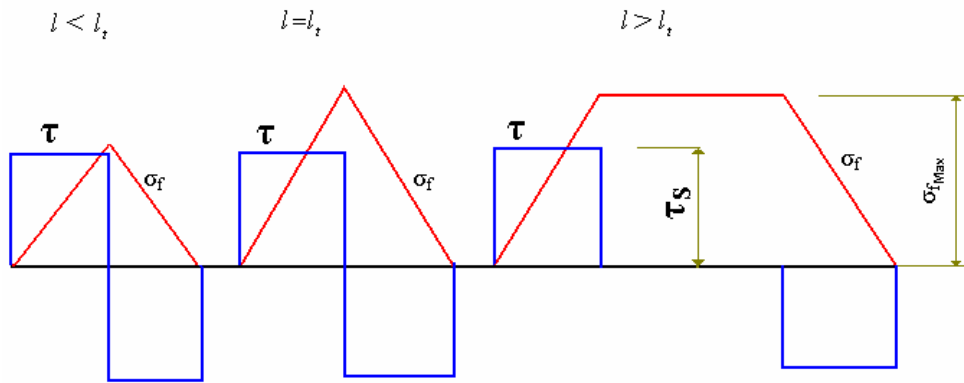
$$\sigma_{f,\max} = E_f \varepsilon_f = E_f \varepsilon_c = E_f \frac{\sigma_c}{E_c} \quad (5)$$

La massima tensione presente nella fibra è in questo caso direttamente proporzionale al carico applicato σ_c ed al rapporto dei moduli di Young di fibra e composito.

Imponendo tale valore della tensione nella (4), si ricava il valore della lunghezza di trasmissione:

$$\frac{E_f}{E_c} \sigma_c = \frac{\tau_s}{r_f} L_t \Rightarrow L_t = \frac{E_f}{E_c} \cdot \frac{\sigma_c}{\tau_s} r_f \quad (6)$$

Per ogni carico σ_c quindi, resta definita una lunghezza L_t necessaria perché si riesca a raggiungere il valore massimo di σ_f . Tale lunghezza cresce al crescere della tensione σ_c applicata al composito e decresce al crescere di τ_s , cioè al crescere della capacità di trasferire carico da parte della matrice.



Fissate quindi le caratteristiche della matrice ed il carico esterno applicato, se la lunghezza delle fibre è inferiore ad L_t la massima tensione sulla fibra si ha in mezzeria e non cresce al crescere del carico esterno:

$$\sigma_f(0) = \frac{\tau_s}{r_f} L$$

mentre la tensione media è:

$$\sigma'_f = \frac{\tau_s}{2r_f} L \quad (7)$$

Se invece la lunghezza delle fibre è superiore alla lunghezza di trasferimento del carico L_t , allora la tensione massima sulla fibra è:

$$\sigma_{f,\max} = \frac{E_f}{E_c} \sigma_c$$

mentre la tensione media è:

$$\sigma'_f = \frac{E_f}{E_c} \sigma_c \left(1 - \frac{L_t}{2L} \right) \quad (8)$$

Mediante la (8) si mostra immediatamente come la tensione media è pari al 90% ed al 99% della tensione relativa al composito a fibra continua se la lunghezza della fibra è pari rispettivamente a 5 e 50 volte la lunghezza L_t .

Dalla definizione della lunghezza di trasmissione si osserva infine che è possibile determinare un valore limite per tale grandezza in corrispondenza del carico che produce nella fibra il valore di rottura $\sigma_{f,R}$.

Tale valore, che si ottiene imponendo nella (4):

$$\sigma_f(0) = \sigma_{f,R} \Rightarrow L_c = \frac{r_f}{\tau_s} \sigma_{f,R} \quad (9)$$

si definisce “*lunghezza critica*” in quanto, per lunghezze inferiori a tale valore, le fibre non possono mai raggiungere il carico di rottura e, quando il composito cede per rottura della matrice, esse scivolano fuori senza rompersi.

8.2.2 Il modello *shear lag* di Cox

Nel modello di Cox (1952) la matrice è considerata a comportamento perfettamente elastico ed il legame fibra-matrice perfetto.

In tali ipotesi, si può scrivere l'equilibrio tra la forza tangenziale generata nella matrice ad una distanza r dall'asse della fibra ($r > r_f$) e la forza tangenziale agente all'interfaccia ($r = r_f$):

$$2\pi r \tau \cdot dz = 2\pi r_f \tau_i \cdot dz \Rightarrow \tau = \frac{r_f \tau_i}{r} \quad (10)$$

dove τ e τ_i sono rispettivamente la tensione tangenziale nella matrice e la tensione tangenziale nell'interfaccia.

L'ipotesi di elasticità lineare della matrice consente inoltre di scrivere, trascurando la variazione dello spostamento radiale lungo z :

$$\gamma = \frac{dw}{dr} = \frac{\tau}{G_m} \quad (11)$$

dove w è lo spostamento della matrice nella direzione z e G_m è il modulo tangenziale della matrice.

Sostituendo la (10) nella (11), si ha:

$$dw = \frac{r_f \tau_i}{G_m} \frac{dr}{r}$$

ed integrando tra r_f ed R :

$$\int_{r_f}^R dw = \frac{r_f \tau_i}{G_m} \int_{r_f}^R \frac{dr}{r} \Rightarrow w(R) - w(r_f) = \frac{r_f \tau_i}{G_m} \ln \left(\frac{R}{r_f} \right)$$

Risolvendo rispetto a τ_i , si ha:

$$\tau_i = \frac{G_m [w(R) - w(r_f)]}{r_f \ln(R/r_f)} \quad (12)$$

relazione che esprime la tensione interfacciale in funzione dello spostamento w della matrice in r_f e R .

Derivando quest'ultima rispetto a z si ottiene:

$$\frac{d\tau_i}{dz} = \frac{G_m}{r_f \ln(R/r_f)} \left[\frac{dw(R)}{dz} - \frac{dw(r_f)}{dz} \right]$$

che, nelle ipotesi di:

- deformazione della matrice per $r=R$ uguale alla deformazione imposta ε_1 :

$$\frac{dw(R)}{dz} = \varepsilon_m = \varepsilon_1$$

- deformazione della matrice per $r=r_f$ uguale a quella della fibra (legame fibra-matrice perfetto):

$$\frac{dw(r_f)}{dz} = \varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f}$$

consente di scrivere:

$$\frac{d\tau_i}{dz} = \frac{G_m}{r_f \ln(R/r_f)} \left[\varepsilon_1 - \frac{\sigma_f}{E_f} \right]$$

Sostituendo l'espressione trovata nella derivata dell'equazione differenziale (1), che esprime l'equilibrio dell'elemento di fibra dz , si ha:

$$\frac{d\sigma_f}{dz} = \frac{2\tau_i}{r_f} \Rightarrow \frac{d^2\sigma_f}{dz^2} = \frac{2}{r_f} \frac{d\tau_i}{dz}$$

$$\frac{d^2\sigma_f}{dz^2} = \frac{n^2}{r_f^2} (E_f \varepsilon_1 - \sigma_f) \quad (13)$$

in cui il parametro di Cox, n , è dato da:

$$n = \sqrt{\frac{2G_m}{E_f \ln(R/r_f)}} = \sqrt{\frac{E_m}{(1+\nu_m)E_f \ln(R/r_f)}} \quad (14)$$

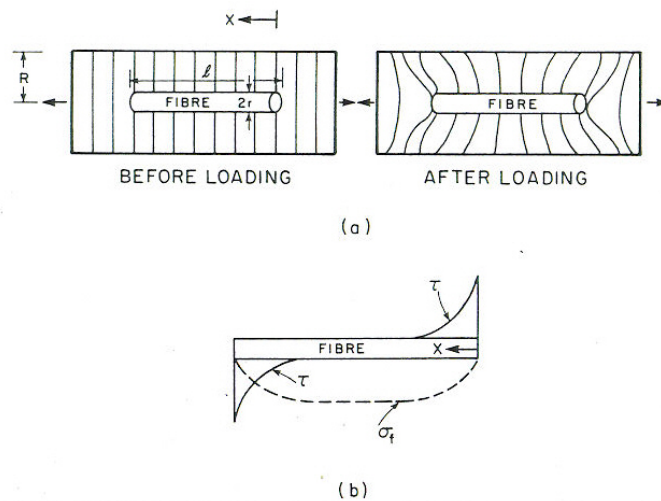
Integrando infine l'equazione differenziale (13), con le condizioni al contorno $\sigma_f=0$ per $z=-L/2$ e per $z=L/2$, si ottiene il profilo della tensione di trazione nella fibra e quello della tensione tangenziale all'interfaccia:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_1 \left[1 - \frac{\cosh\left(ns \frac{2z}{L}\right)}{\cosh(ns)} \right] \quad (15)$$

$$\tau_i = \frac{1}{2} n E_f \varepsilon_1 \frac{\sinh\left(ns \frac{2z}{L}\right)}{\cosh(ns)} \quad (16)$$

in cui è esplicitata la dipendenza dal *rapporto di aspetto*:

$$s = \frac{L}{2r_f}$$



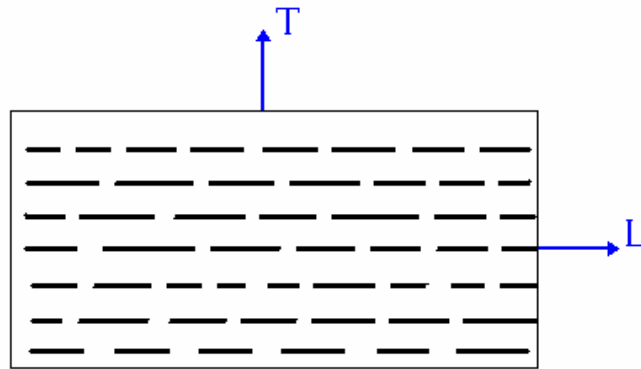
In base a questo modello lo sforzo tangenziale all'interfaccia fibra-matrice è massimo alla fine della fibra e scende a zero nella zona centrale. E' in questa zona che gli sforzi passano dalla matrice alle fibre generando progressivamente delle tensioni di trazione all'interno della fibra, che raggiungono il valore massimo nel centro della stessa.

Molte analisi sperimentali hanno dato risultati analoghi che differiscono solo per il valore di n.

8.3 Compositi con fibre corte unidirezionali

L'effetto più rilevante dell'annullamento del carico alle estremità delle fibre, è la diminuzione del modulo e del carico a rottura del composito rispetto ai valori relativi ad un composito con la stessa percentuale volumetrica di fibre lunghe.

Considerando una sezione del composito a fibre corte unidirezionali ortogonale alla direzione del carico e delle fibre, la sezione interseca un numero casuale di fibre.



Lo sforzo supportato dal composito è:

$$\sigma_1 = \phi_f \sigma'_f + (1 - \phi_f) \sigma_m \quad (17)$$

dove σ'_f è il carico medio supportato dalle fibre intercettate nella sezione:

$$\sigma'_f = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \sigma_f \cdot dz$$

Se si utilizza l'espressione di σ_f ricavata da Cox, il valor medio della tensione nella fibra è dato da:

$$\sigma_f' = \frac{E_f \varepsilon_1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \left[1 - \frac{\cosh\left(ns \frac{2z}{L}\right)}{\cosh(ns)} \right] \cdot dz = E_f \varepsilon_1 \left[1 - \frac{\tanh(ns)}{ns} \right]$$

Sostituendo tale espressione nell'equazione (17), si ottiene:

$$\sigma_1 = \phi_f E_f \varepsilon_1 \left[1 - \frac{\tanh(ns)}{ns} \right] + (1 - \phi_f) \sigma_m$$

Definendo “*fattore di efficienza della lunghezza*” la quantità:

$$\eta_L = \left[1 - \frac{\tanh(ns)}{ns} \right]$$

si ha:

$$\sigma_1 = \eta_L \phi_f \sigma_f + (1 - \phi_f) \sigma_m$$

$$E_1 = \eta_L \phi_f E_f + (1 - \phi_f) E_m$$

E' evidente in queste espressioni l'analogia con quelle ottenute per i compositi a fibre lunghe (regola delle miscele) a meno del fattore di efficienza della lunghezza η_L , che può assumere valori compresi tra 0 e 1. In particolare, al crescere di η_L aumenta la rigidezza del composito e la percentuale di carico sopportata dalle fibre. Il prodotto ns , con cui η_L cresce, è quindi un parametro critico nella trasmissione degli sforzi; per un migliore trasferimento del carico ns , e di conseguenza il rapporto lunghezza/diametro delle fibre, deve essere il più alto possibile.

Il prodotto ns dipende non solo dal rapporto di forma delle fibre, ma anche dal parametro adimensionale n . Come evidenziato nella sua definizione, per potere ricavare n è necessario conoscere il valore di R .

Sono state formulate diverse espressioni per R/r_f , ma tutte possono essere ricondotte alla forma:

$$\frac{R}{r_f} = \sqrt{\frac{K_r}{\phi_f}}$$

dove K_r è una costante che dipende da come si assume la disposizione relativa delle fibre nello spazio. Nella tabella 4.1 sono riportati alcuni valori che il parametro K_r può assumere in base all'arrangiamento geometrico delle fibre.

Arrangiamento fibre	K_r
Cox	$\frac{2\pi}{\sqrt{3}} = 3,628$
Cilindrico	1
Esagonale	$\frac{\pi}{2\sqrt{3}} = 0,907$
Quadrato	$\frac{\pi}{4} = 0,785$
Tabella 4.1	

8.4 Compositi con fibre corte random

In compositi con fibre corte non allineate si ha un'ulteriore riduzione delle proprietà meccaniche del composito dovuta all'orientamento delle fibre.

Per quantificare tale riduzione Krenchel modificò le relazioni trovate per i compositi a fibra corta attraverso l'introduzione di un parametro adimensionale η_o che misura la probabilità di avere le fibre orientate in direzione del carico.

$$\eta_o = \sum_n a_n \cos^4(\varphi_n)$$

Dove a_n è la frazione di fibre orientate ad un angolo φ_n rispetto alla direzione del carico.

Il “*fattore di orientamento di Krenchel*” può variare tra 0 ed 1 e raggiunge il valore limite 1 quando tutte le fibre sono parallele al carico.

In particolare, nel caso in cui le fibre sono orientate casualmente nel volume, η_o assume il valore 0,2, mentre, nel caso di disposizione random nel piano, tale valore aumenta a 0,375.

Con tale correzione, le proprietà meccaniche dei compositi con fibre corte disposte casualmente, sono espresse dalle relazioni:

$$\sigma_1 = \eta_o \eta_L \phi_f \sigma_f + (1 - \phi_f) \sigma_m$$

$$E_1 = \eta_o \eta_L \phi_f E_f + (1 - \phi_f) E_m$$

8.5 Compositi con fibre corte – modelli con interfaccia imperfetta

I modelli di interfaccia imperfetta sono principalmente di due tipi: modelli che distinguono una zona perfettamente incollata da una scollata e modelli che trattano l'interfaccia come una zona coesiva ad ogni istante.

I primi considerano l'interfaccia divisa in due parti:

- una parte perfettamente incollata dove l'iniziale aderenza di natura fisica o chimica tra fibra e matrice risulta inalterata. Tale aderenza è sufficientemente forte da assicurare la continuità sia degli spostamenti che delle tensioni all'interfaccia.
- L'altra parte, detta zona scollata, caratterizzata da una relazione costitutiva che tiene conto degli spostamenti relativi tra fibra e matrice e dei fenomeni di attrito che si verificano.

Questi modelli di interfaccia si basano su un criterio di distacco della fibra dalla matrice. Questo significa che la zona scollata avanza quando risulta soddisfatto tale criterio. Inoltre si assume, in generale, che la zona scollata sia caratterizzata da uno slittamento attritivo con tensione tangenziale attritiva τ_s costante.

Due sono i criteri di distacco più comunemente adottati: uno basato sulla energia di frattura e l'altro sulla resistenza.

Secondo il primo criterio, deve essere fornita un'adeguata energia all'estremità della zona scollata dell'interfaccia per farla avanzare. Questa energia corrisponde all'energia di frattura caratteristica dell'interfaccia e dalla lunghezza della fibra.

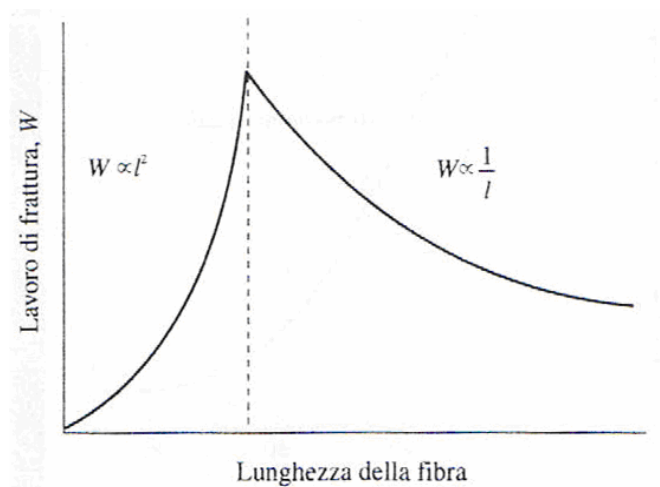
E' stato valutato che il lavoro di estrazione W , delle fibre con $L < L_c$ è pari a:

$$W = \frac{\phi_f \tau_i L^2}{24 r_f}$$

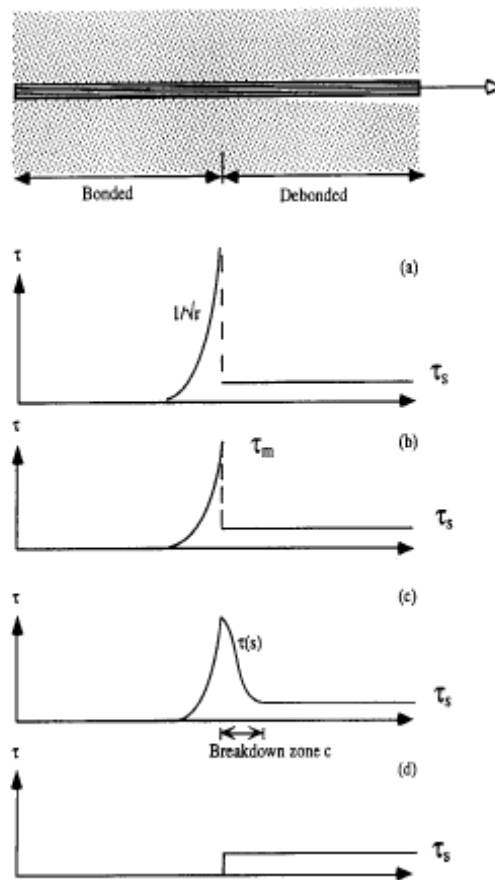
mentre quello delle fibre lunghe $L > L_c$ è pari a:

$$W = \frac{\phi_f \tau_i L_c^3}{24 r_f L}$$

Riportando in un grafico le due precedenti espressioni si nota che il massimo lavoro dissipato si ha quando la lunghezza delle fibre è uguale a quella critica.



Un criterio alternativo di distacco dell'interfaccia è basato sulla resistenza; secondo questo modello la zona scollata avanza quando le tensioni tangenziali, nella fibra o nella matrice, che risultano uguali nella zona perfettamente incollata, raggiungono il valore critico τ_d .



L'attrito gioca un ruolo sempre più importante con l'aumentare delle dimensioni della fibra e della tensione laterale di confinamento: quando la fibra inizia a sfilarsi dalla matrice, l'intera interfaccia può essere considerata priva di aderenza con l'attrito che mantiene unite la fibra alla matrice.

Questa rappresenta un'assunzione molto comune anche adottata per determinare la resistenza d'aderenza nei test di pull-out, e largamente utilizzata nei modelli micromeccanici dei materiali compositi.

Il secondo tipo di modelli, detti coesivi, non distingue tra una zona incollata ed una zona scollata ed introduce un'unica relazione costitutiva lungo l'intera inter-faccia, assumendo che solo gli spostamenti relativi tra fibra e matrice generino un trasferimento di tensioni.

Caratterizzazione dell'interfaccia fibra-matrice

Le proprietà meccaniche di un composito a fibre corte sono fortemente influenzate dai modi attraverso i quali si esplica il trasferimento dei carichi tra la matrice e il rinforzo. Poiché l'elemento che regola tale interazione è l'interfaccia fibra-matrice, uno studio volto a determinarne le caratteristiche fornirà le informazioni necessarie alla scelta della migliore lunghezza delle fibre e alla valutazione della corrispondente resistenza del composito.

Lo scopo della seguente campagna sperimentale è quello di identificare e quantificare i parametri fondamentali per la determinazione della resistenza interfacciale. A tal fine sono state eseguite prove di pull-out di singole fibre confrontando i risultati ottenuti con i modelli di Cox e di Kelly-Tyson.

9.1 La prova di pull-out.

L'interfaccia fibra matrice è un elemento fondamentale per i compositi, essendo responsabile del trasferimento del carico dalla matrice alla fibra.

A livello micro meccanico l'interazione interfacciale è generalmente descritta in termini di vari parametri che caratterizzano il carico trasferito attraverso l'interfaccia: resistenza di legame, tensione tangenziale di interfaccia e velocità di rilascio dell'energia critica.

Dal punto di vista ingegneristico, le proprietà rilevanti sono l'efficienza di trasferimento della tensione e la resistenza dell'interfaccia.

Questo approccio include tre problemi strettamente correlati:

- 1) Scelta dei parametri da misurare;
- 2) Adeguata scelta del tipo di prova da effettuare;
- 3) Sviluppo di modelli per correlare i risultati del test ai parametri dell'interfaccia.

Per determinare i parametri di interazione di interfaccia tra fibre e matrice, sono stati sviluppati diversi tipi di prove, che possono essere divisi in due gruppi:

- il primo include prove in cui il carico esterno è applicato direttamente alla fibra, tra le quali le principali sono il single fiber pull out test e push out test, ed è adeguato per compositi a matrice fragile;
 - l'altro prevede il carico esterno applicato solo alla matrice (single fiber fragmentation test) ed è adeguato allo studio di composite a matrice duttile.

Nei test di pull out il carico applicato alle estremità della fibra è registrato in funzione del suo spostamento.

Il parametro che usualmente è utilizzato per caratterizzare la qualità del legame interfacciale è la tensione tangenziale media apparente (apparent IFSS).

La caratterizzazione quantitativa delle proprietà dell'interfaccia fibra matrice richiede che sia preso in considerazione il meccanismo di cedimento dell'interfaccia,

includendo l'uso di parametri di interfaccia locali e la distinzione dei contributi dovuti all'adesione ed all'attrito.

9.2 Esecuzione dei test: chiodi a due tows.

Non essendo possibile eseguire la prova di estrazione della fibra ammorsando la matrice cementizia nella ganascia senza danneggiarla, sono stati ricavati degli stampi da un profilato metallico a sezione scatolare 50x10 della larghezza di 30 mm. Con essi, preventivamente intagliati su un bordo, sono stati realizzati dei provini inserendo i chiodi di carbonio a 2 tows a diverse profondità ed etichettandoli secondo la lunghezza di fibra immersa nella matrice.



Fig.7.1-Provini Pull-Out



Fig7.2-Esecuzione della prova

I provini così realizzati sono stati successivamente testati a una settimana e a due settimane dalla loro realizzazione mediante la macchina di prova MTS Alliance RT Material Test System da 50KN rilevandone i diagrammi Carico(N)-Spostamento(mm).

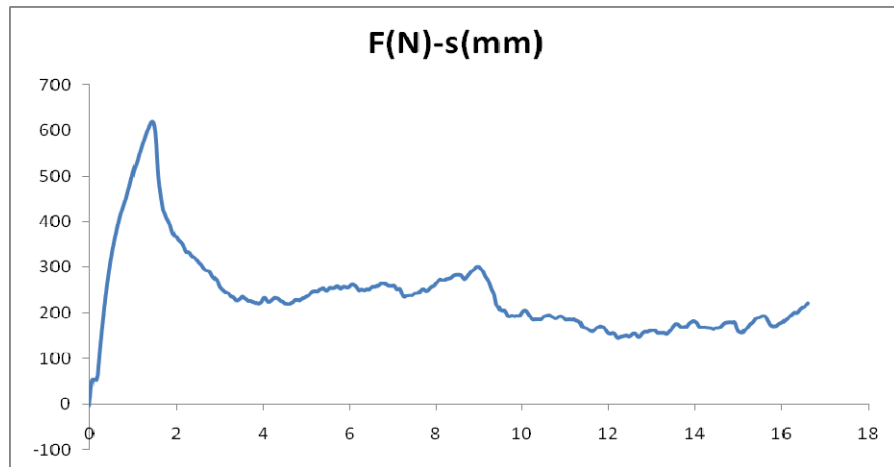


Fig.7.3-Diagramma F-s della prova di Pull-Out relativo a un chiodo a 2 tows sfilato dalla matrice a 2 settimane: $L_i=30$ mm.

Da tali diagrammi sono stati rilevati, per ogni lunghezza di fibra inizialmente immersa L_i , i valori massimi della forza di estrazione F_{\max} e i corrispondenti valori della tensione tangenziale apparente, calcolata considerandola uniformemente distribuita sulla superficie di contatto quando il carico assume il valore massimo:

$$\tau_{app} = \frac{F_{\max}}{2\pi r_f L_i}$$

Si sono, quindi, riportati i valori medi ottenuti di tali grandezze in funzione della lunghezza iniziale di fibra immersa L_i .

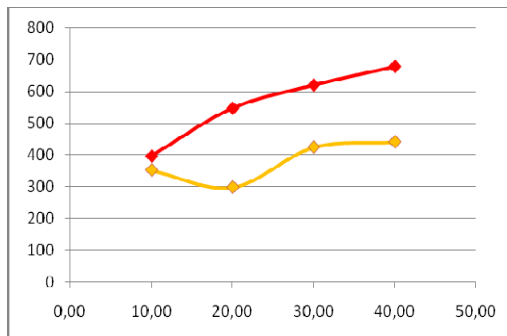


Fig.7.4- F_{\max} di Pull-Out in funzione della lunghezza iniziale di fibra immersa dopo 1 e dopo 2 settimane

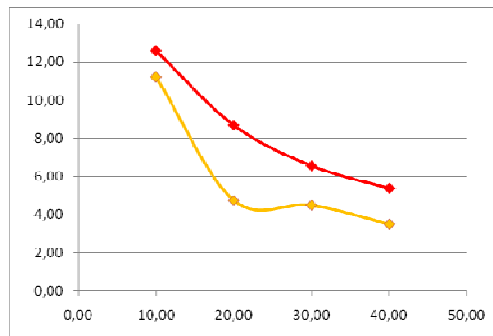


Fig.7.5- τ_{app} in funzione della lunghezza iniziale di fibra immersa dopo 1 e dopo 2 settimane.

9.3 Analisi dei risultati.

L'evidenza sperimentale ha dimostrato:

- Per lunghezze $L_i \geq 40$ mm si ha, nella maggior parte dei casi, rottura del chiodo;
- per lunghezze $L_i < 40$ mm si ha sempre sfilamento del chiodo.

La prima osservazione ha consentito di identificare la lunghezza critica per i chiodi a due tows, ossia la lunghezza minima per la quale, durante la rottura del composito, il cedimento è accompagnato dalla rottura dei chiodi anziché dallo sfilamento degli stessi dalla matrice.

Essendo la prova di pull out condotta sulla semilunghezza del rinforzo, tale valore è, per i chiodi a due tows:

$$L_c = 80 \text{ mm}$$

cui corrisponde, per il diametro del chiodo utilizzato, un *rapporto di aspetto*:

$$s = 66,6.$$

La seconda osservazione ha consentito di studiare il meccanismo di trasferimento del carico, per individuare il modello maggiormente adeguato per la descrizione del comportamento macroscopico del materiale.

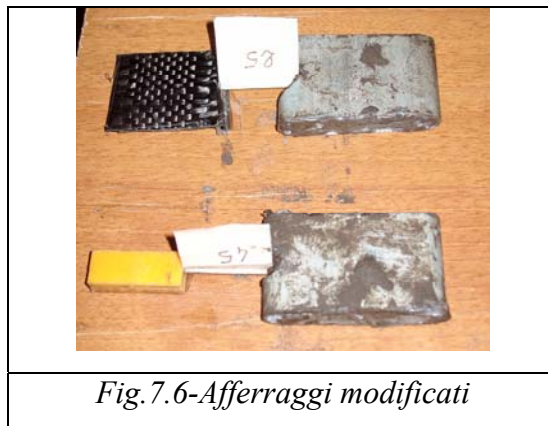
Considerato che la dimensione sopra indicata (80 mm) non consente di realizzare il composito a causa della sua eccessiva lunghezza, si è ritenuto di eseguire ulteriori prove di pull out utilizzando chiodi a un tow, con un diametro, quindi, pari alla metà del diametro dei chiodi utilizzati in precedenza e con lunghezze, a parità di *rapporto di aspetto*, dimezzate.

9.4 Esecuzione dei test: chiodi a un tow.

Per ottenere lo stesso numero di punti sperimentali, è stato dimezzato l'intervallo tra le diverse lunghezze d'immersione del chiodo, portandolo a 5 mm.

Per effetto della diminuita dimensione del diametro dei chiodi, si è evidenziato, nei test condotti con campioni aventi una settimana di stagionatura, che, a causa della pressione esercitata nell'afferraggio dell'estremità durante la trazione, nei casi in cui il chiodo si è rotto, la rottura stessa si è verificata per valori inferiori a quelli della sua resistenza.

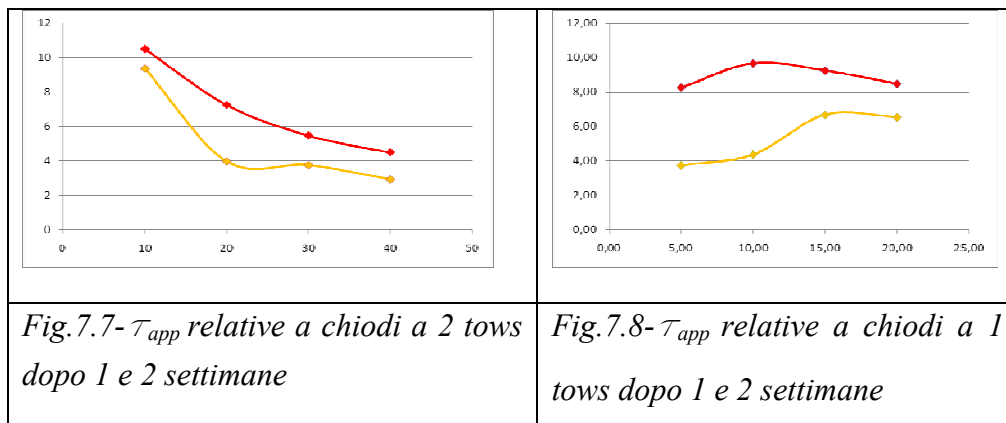
Per ovviare a tale inconveniente, si è reso necessario modificare il sistema di afferraggio ed è stato utilizzato, nelle prove successive a due settimane, un sistema di presa ottenuto con ritagli di tessuto 0° - 90° di carbonio e resina epossidica, che ha consentito di misurare valori più precisi della resistenza a trazione con rotture sempre localizzate esternamente alla pinza della macchina di prova.



9.5 Analisi dei risultati.

Anche in questa campagna di prove si sono verificati due differenti modi di rottura

- Per lunghezze $L_i \geq 20$ mm si ha, nella maggior parte dei casi, rottura del chiodo;
- Per lunghezze $L_i < 20$ mm si ha sempre sfilamento del chiodo.



L'analisi comparativa delle curve relative a una e a due settimane di stagionatura mostra, per entrambe le tipologie di chiodi, un miglioramento della τ_{app} compresa tra 12 e 80% per i chiodi a due tows e tra il 38 e 120% per i chiodi a un tow.

L'aleatorietà di tali risultati non consente di utilizzare le curve rilevate a una settimana se non per considerazioni qualitative. Con tali limitazioni, tuttavia, appare significativo lo spostamento del valore massimo delle τ_{app} relativo ai chiodi a un tow verso valori della lunghezza d'immersione più bassi. Essendo tale grandezza strettamente correlata alla lunghezza critica dei chiodi, un'indagine sperimentale con tempi di stagionatura di 28 giorni potrebbe rivelarsi utile a ridurla significativamente.

La presenza di un valore massimo della τ_{app} per L_i compresa tra 10 e 15 mm, peraltro non rinvenuta nelle analoghe curve dei chiodi a due tows, autorizza alcune considerazioni di tipo micro meccanico.

Essendo tali valori medi riferiti alla condizione limite di aderenza tra chiodo e matrice, essi possono essere correlati con distribuzioni di tensione tangenziale aventi lo stesso picco τ_d (tensione di delaminazione).

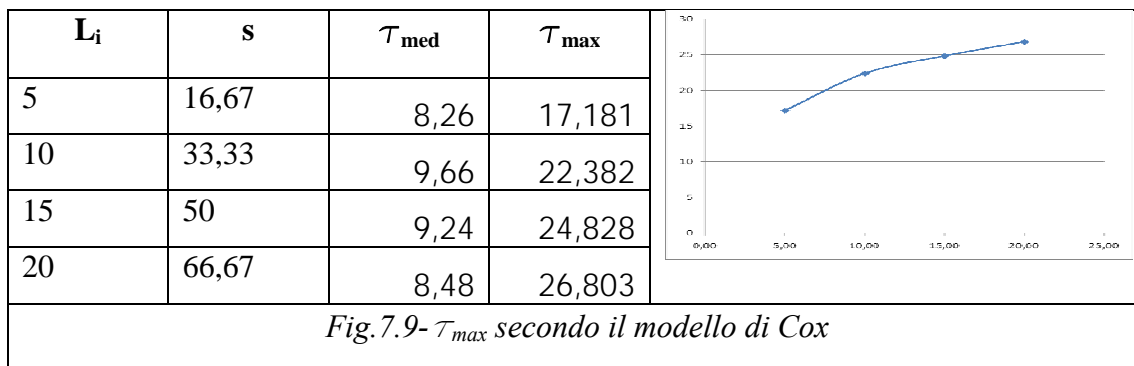
Ipotizzando, per ogni lunghezza di immersione dei chiodi, sempre perfetta l'adesione fibra matrice, e considerando il comportamento elastico, attraverso la relazione derivata dal modello di Cox:

$$\tau_{\max} = \tau \left(\frac{L}{2} \right) = \tau_{\text{med}} \frac{(ns) \sinh(ns)}{\cosh(ns) - 1}$$

si sono calcolati, per

$$n = \sqrt{\frac{E_m}{(1 + \nu_m) E_{CH} \ln(R/r_{CH})}} = \sqrt{\frac{510}{1,15 \cdot 92880 \cdot \ln(15)}} = 0,042$$

i valori massimi teorici della tensione tangenziale corrispondenti ai diversi rapporti di aspetto:



Tali valori differenti, escludendo l'ipotesi di continuità elastica tra i due componenti, hanno suggerito la presenza, oltre una lunghezza L_{el} da determinare, di un meccanismo di delaminazione dell'interfaccia nel punto più sollecitato con conseguente:

- migrazione degli sforzi tangenziali elastici alla porzione di rinforzo ancora aderente;
- attivazione di sforzi tangenziali di attrito, τ_{att} nella zona delaminata.

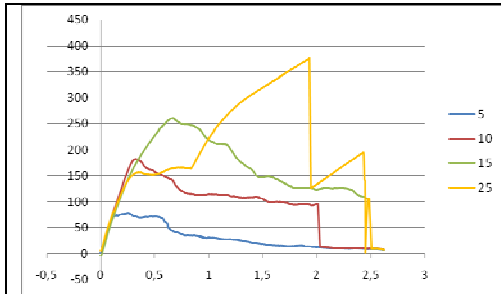


Fig.7.10-Diagrammi di pull out dei chiodi ad 1 tow

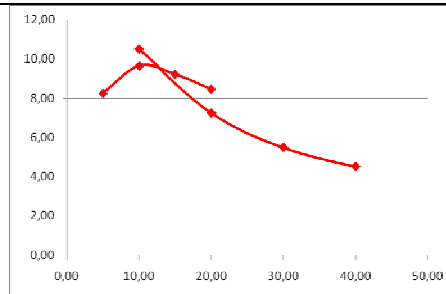


Fig.7.11-Confronto τ_{med} relative ai chiodi ad 1 tow e a 2 tows a 2 settimane

Per determinare le incognite L_{el} e τ_{att} si sono confrontati i diagrammi di pull out relativi e si è osservato:

- per $L_i=5$ mm e $L_i=10$ mm, il carico cresce linearmente con la stessa pendenza;
- per $L_i=15$ mm il diagramma cresce ancora con la stessa pendenza dei precedenti ma, al valore della forza $F \cong 180$ N, presenta una variazione di inclinazione.

Tale comportamento è ascrivibile ad una condizione di perfetta adesione del chiodo fino a forze di trazione inferiori a 180 N, e alla formazione, al crescere del carico, di una zona delaminata. Il successivo incremento di carico è poi giustificato dalla presenza delle forze di attrito tra la parte delaminata e la matrice che va a sommarsi al carico sostenuto dalla parte ancora aderente.

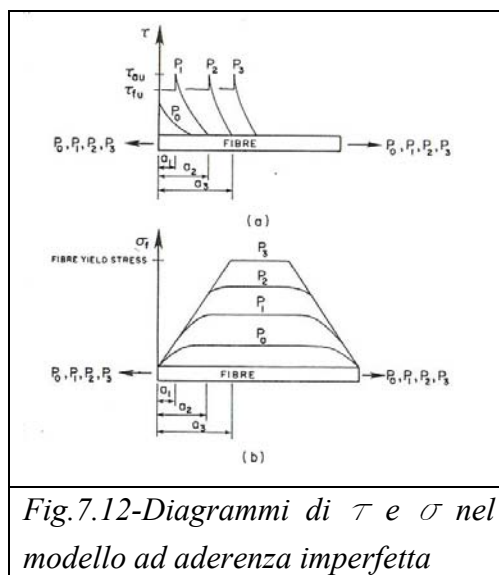


Fig.7.12-Diagrammi di τ e σ nel modello ad aderenza imperfetta

A conforto di tali ipotesi si è riportato, nei diagrammi di pull out a confronto, anche quello relativo alla prova a $L_i=25$ mm, considerata anomala per l'avvenuto sfilamento del chiodo dalla matrice. Alla luce delle considerazioni fatte, si può giustificare tale discordanza di comportamento mediante l'osservazione di uno scorrimento eccessivo all'insorgere della delaminazione che, oltre a ridurre la superficie di attrito, rende brusca la transizione tra i due meccanismi di trasferimento di carico.

Assumendo quindi che, nelle condizioni limite, per chiodi di lunghezza maggiore, la zona non delaminata sia $L_e=10$ mm e imponendo che su tale superficie si abbia una distribuzione elastica degli sforzi tangenziali, con valore massimo $\tau_{\max}=\tau_d=22,326$ MPa e valore medio $\tau_{\max}=9,66$ MPa, è immediata la determinazione della tensione tangenziale di attrito. Utilizzando infatti il valore sperimentale della tensione tangenziale apparente del chiodo immerso con $L_i=15$ mm, si ha:

$$15 \cdot \tau_{app}(15) = 10 \cdot \tau_{app}(10) + 5 \cdot \tau_s \Rightarrow \tau_s = \frac{15 \cdot 9,24 - 10 \cdot 9,66}{5} = 8,4 \text{ MPa}$$

Con tale valore si può calcolare la tensione tangenziale per il chiodo immerso con $L_i=20$:

$$\tau_{app}(20) = \frac{10 \cdot \tau_{app}(10) + 10 \cdot \tau_s}{20} \Rightarrow \tau_{app} = \frac{10 \cdot 9,66 + 10 \cdot 8,4}{20} = 9,03 MPa$$

e verificare che, per tale lunghezza, il chiodo si rompe, anzicchè sfilarsi, se ha resistenza a trazione:

$$\sigma_R \leq \frac{2 \cdot \tau_{app}(20) \cdot 20}{r_{CH}} = \frac{2 \cdot 9,03 \cdot 20}{0,3} = 1204 MPa$$

Essendo il valore medio di rottura, rilevato sperimentalmente dalle prove di pull out per $L_i > 20$ mm, pari a 1172 MPa si può infine concludere che, per i chiodi ad un tow, la lunghezza critica è:

$$L_c = 40 \text{ mm}$$

cui corrisponde lo stesso *rapporto di aspetto* del chiodo a due tows di lunghezza $L_c = 80$ mm:

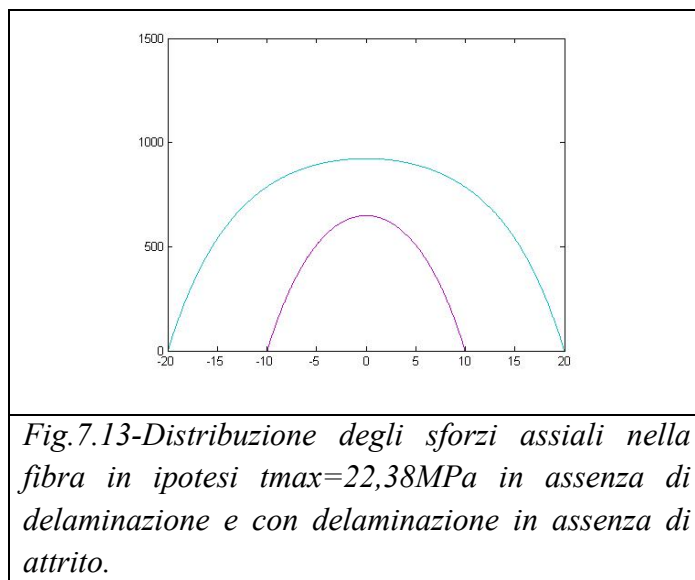
$$s = 66,6.$$

9.6 Scelta del modello

La presenza dell'azione meccanica dovuta alla modifica della superficie di interfaccia, ottenuta mediante il rivestimento di sabbia fine, consente di ottenere una lunghezza critica, per i chiodi ad un tow di 40mm, inferiore a quella che si calcolerebbe in ipotesi di perfetta adesione e comportamento elastico.

Imponendo infatti $\tau_{\max} = \tau_d = 22,38 \text{ MPa}$ si ottiene, dal modello di Cox, per i chiodi della stessa lunghezza e diametro, $\sigma_{\max} = 923 \text{ MPa}$.

Se la rugosità dell'interfaccia svolgesse solo un ruolo di miglioramento dell'adesione, considerando nulla la τ_s , il limite imposto dalla tensione tangenziale di delaminazione τ_d consentirebbe di trasferire, per la sola lunghezza centrale ancora aderente, una tensione massima ancora minore: $\sigma_{\max} = 649 \text{ MPa}$.



Risulta quindi determinante l'azione meccanica prodotta dallo strato di interfaccia. L'osservazione dei chiodi sfilati peraltro, evidenziando la rottura tra resina e fibra, fa ritenere che l'utilizzo di una con proprietà meccaniche più elevate, consentirebbe di

incrementare il valore di τ_s , e quindi di ridurre ulteriormente la lunghezza critica dei chiodi.



Fig.7.14-Rottura del rivestimento di resina di un chiodo a 2 tows nella prova di Pull-Out per una lunghezza di fibra inizialmente immersa $L_i=30$

Infine il confronto tra i diagrammi ottenuti dal modello di Cox, con la condizione che $\sigma_{\max}=1200\text{MPa}$ con quello del modello misto, ottenuto traslando il diagramma elastico (relativo alla lunghezza 20mm centrale ancora aderente) del valore:

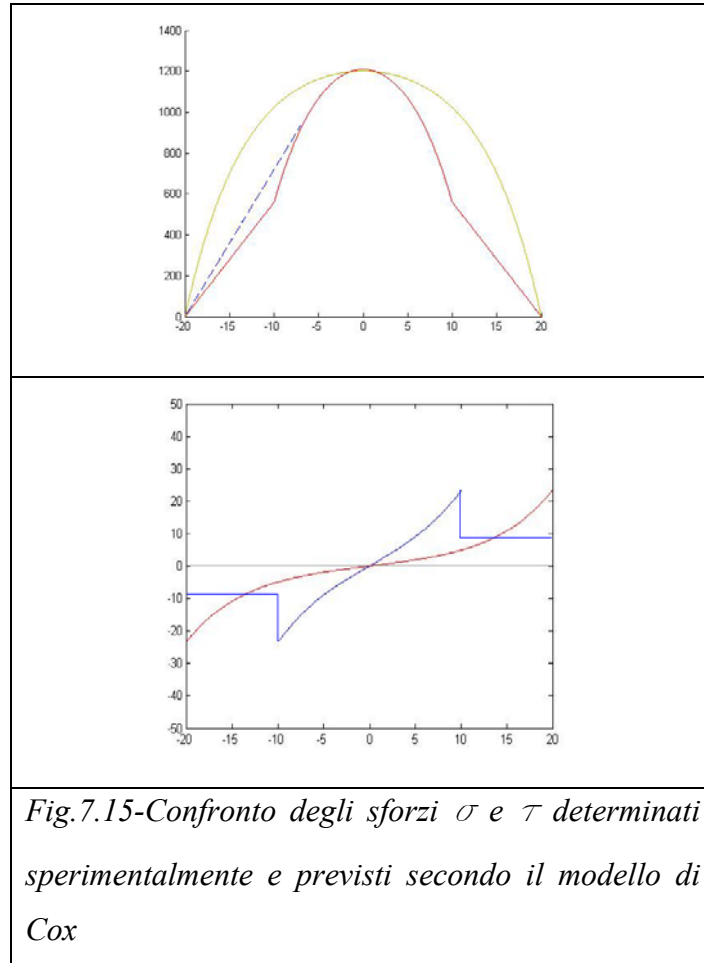
$$\sigma = \frac{2\tau_s}{r_{CH}} 10 = 560\text{MPa}$$

E raccordando le estremità con tratti lineari di equazione:

$$\sigma(z) = \frac{2\tau_s}{r_{CH}} (z + 20) = 72(z + 20)$$

$$\sigma(z) = 40 - \frac{2\tau_s}{r_{CH}} (z + 20) = 40 - 72(z + 20)$$

consente di affermare che, anche se non è verificata l'ipotesi di perfetta aderenza, è ancora utilizzabile il modello di Cox Krenchel, anche se sovrastima le proprietà attese dal composito.

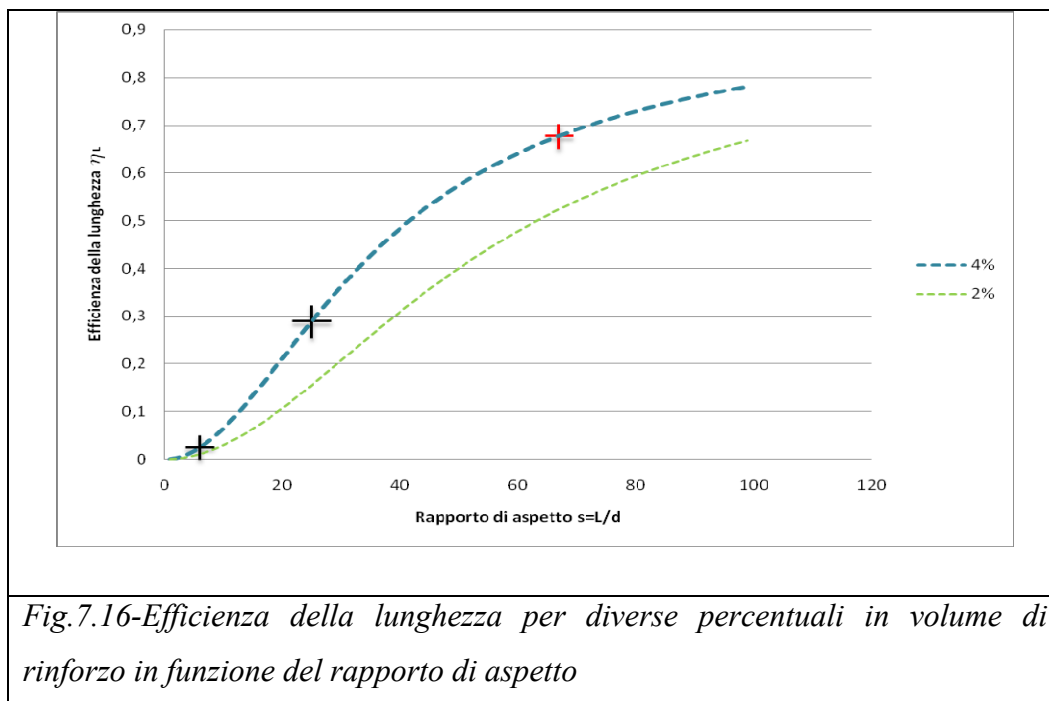


Secondo tale modello è possibile stimare il modulo di Young del composito e la resistenza a trazione attraverso le relazioni:

$$E_c = \eta_o \eta_L \phi_{CH} E_{CH} + (1 - \phi_{CH}) E_m$$

$$\sigma_{c,R} = E_c \varepsilon_{CH,R}$$

Utilizzando i chiodi di armatura in uno strato di circa 1cm, il fattore di orientamento può essere assunto pari a 0,375; ricorrendo poi ai valori diagrammati del fattore di efficienza della lunghezza, si sono stimati gli incrementi della resistenza del composito utilizzando i chiodi ad 1tow, della lunghezza critica determinata di 40mm, in percentuale volumetrica del 4%.



$$E_c = 0,375 \cdot 0,672 \cdot 0,04 \cdot 92880 + (1 - 0,04)510 = 1425,8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,R} = 1425,8 \cdot 0,015 = 21,39 \text{ MPa}$$

Tali valori, stimando per eccesso le proprietà meccaniche del composito, indicano che si può avere un incremento non superiore al 180% della rigidezza e al 34% della resistenza rispetto alla sola matrice.

Conclusioni

Lo studio di un innovativo sistema di rinforzo per pareti murarie, ha portato alla definizione di un composito a matrice cementizia, in grado di assicurare buone caratteristiche di adesione alla muratura, buona resistenza alla temperatura e, con un'opportuna scelta della fase di rinforzo, buone caratteristiche meccaniche.

E' stato sviluppato un sistema di consolidamento di pannelli in muratura, ottenuto mediante l'applicazione di uno strato di circa 1cm di composito su entrambe le facce della parete da rinforzare. Tale consolidamento, impiegando metodi tradizionali di posa in opera, non richiede particolari specializzazioni per la manodopera e inoltre, per la composizione chimica del cemento utilizzato, conserva la sua funzione di rinforzo anche quando esposto al calore.

Il composito individuato impiega una matrice costituita da cemento alluminoso, lattice e fibre di carbonio in cui è dispersa una fase di rinforzo costituita da chiodi in fibra di carbonio e resina epossidica ad aderenza migliorata.

La verifica funzionale del rinforzo ha richiesto la scelta di metodi di prova idonei a quantificare i benefici del rinforzo sull'opera muraria: la prova di flessione su due mattoni attestati e la prova di compressione diagonale.

Le prime prove hanno consentito di rilevare la perfetta compatibilità tra la matrice cementizia e il supporto murario, indispensabile per il trasferimento dei carichi al rinforzo.

Una successiva campagna sperimentale di compressione diagonale, condotta su campioni di muratura privi di rinforzo e su campioni rinforzati, ha confermato l'efficacia dell'intervento modificando il meccanismo di cedimento del pannello murario.

Tutte le fessure riscontrate sui campioni rinforzati hanno interessato infatti solamente la zona effettivamente compressa lungo la direzione di carico senza propagarsi lungo i letti di malta esterni a tale zona e coinvolgendo indifferentemente sia la malta che il laterizio.

La rilevanza dei risultati raggiunti ha promosso un'indagine più approfondita sul ruolo della fase di rinforzo nel composito ed ha consentito di individuare un modello analitico in grado di correlare ad essa le proprietà meccaniche globali.

Essendo le proprietà meccaniche di un composito a fibre corte fortemente influenzate dalle modalità attraverso le quali si esplica il trasferimento dei carichi tra la matrice e il rinforzo, la scelta del modello è stata subordinata all'esecuzione di prove di pull out.

Il modello micromeccanico scelto, del tipo ad interfaccia imperfetta, ha consentito di dimostrare il ruolo fondamentale del rivestimento dei chiodi nel trasferimento dei carichi dopo la loro parziale delaminazione e di determinare la relazione che permette di calcolare la lunghezza critica del rinforzo in funzione del suo diametro e della sua resistenza.

Lo sviluppo di tale modello, subordinato ad una razionale pianificazione sperimentale, consentirà di scegliere la geometria e la percentuale volumetrica necessarie a modulare la rigidezza e la resistenza del composito e di individuarne i limiti tecnologici di miglioramento.

Bibliografia

I. Crivelli Visconti I., “*Materiali Compositi. Tecnologie e progettazione*”, Tamburini Editore, Milano, 1985.

I. Crivelli Visconti I., “*Appunti dalle lezioni del corso di Tecnologie dei Materiali non Convenzionali*”

I. Crivelli Visconti et al. , “*Tecnologie di produzione meccanica*”, Edizioni Cremonese, 1976 .

Schwarz, Mal M., “*Composite Materials Handbook*”, McGraw Hill, Inc., New York, 1992.

Bagwan D. Agarwal, Lawrence J. Broutman , “*Analysis and performance of fiber composites*”, John Wiley & Sons, New York, 1980.

Bathe K.J., “*Numerical Methods in Finite Element Analysis*” Prentice-Hall (1976).

ZienKiewicz O.C., “*The Finite Element Method in Engineering Science*”, vol. I – II - III, Mc Graw-Hill

Barnes, F. “*Composites Reinforcement of Steel Structural Members, Proceedings of Institute of Mechanical Engineers seminar*”, London, 17 November 1994.

F. Giusti, M. Santochi, “*Tecnologia meccanica e studi di fabbricazione*”, 1990 Casa Editrice Ambrosiana.

Capozucca R., Cerri M. N., Zannarini G., “*Resistenza a taglio di murature con blocchi in laterizio*”, in *Costruire in laterizio*, n.84 Nov/Dic. 2001.

Castellani A., Benedetti B., Castaldi A., Faccioli E., Grandori G., Nova R., “*Costruzioni in zona sismica*”, Masso Italia Editori, Milano, 1981.

Valluzzi M. R., Tinazzi D., Modena C., “*Prove a taglio su elementi murari rinforzati con tessuti in FRP, Atti Convegno Nazionale Meccanica delle strutture in muratura rinforzate con FRP-materials*”, IUAV, Venezia, 7-8 dicembre 2000, Ed. Libreria Cortina, Padova.

“Plastix” – Aprile 2008, pag. 30.

Normative:

CNR- DT 200- 2004

CNR- DT 204- 2006

ASTM E519-74

UNI EN 196-1 del Luglio 2005

Siti web:

<http://www.olympus-frp.com>

<http://www.euro-composites.com>

<http://www.plymouth.ac.uk>

<http://www.espci.fr>